

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Vybrané diagnostické metody lokalizace zemního
spojení v sítích VN**

**Selected Diagnostics Methods – Localization of Earth Faults in
Medium Voltage Electrical Power Networks**

Diplomová práce

Duben 2010

Bc. Pavel Richter

Školitel: doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D

Poděkování

Děkuji svému školiteli doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D. za odborný dohled, cenné rady, užitečné připomínky, které mi byly během zpracování této diplomové práce poskytnuty.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, že jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Karviné, dne 27.4.2010

Bc. Pavel Richter

Anotace

Distribuční síť vysokého napětí je složitý třífázový systém. Většina poruch, které se v něm vyskytují, jsou charakteru zemního spojení. Lokalizace místa zemního spojení je velice komplikovaná. Diplomová práce se zabývá popisem provozu vysokonapěťových sítí jak v bezporuchovém, tak i poruchovém stavu. Je zde popsán princip ochran pro lokalizaci zemního spojení a tak zvané „šentování“, které má pozitivní vliv na bezpečnost v místě zemního spojení. Praktická část je věnována vyhodnocení měření na různém typu poruchy v síti s nepřímo uzemněným uzlem transformátoru přes indukčnost.

Klíčová slova: vysokonapěťové sítě, zemní spojení, vyhodnocení měření, „šentování“

Abstract

Distributive high voltage network is a complicated three-phase system. Most defects occurring in the network are caused by the ground faults. Detection of the defect point is very complicated. The thesis deals with the operation of high voltage networks in both states of failure and failure-free. The principle of the earth fault location protection is also described in the thesis as well as shunting which effectively influences the safety of the ground fault location. The following part of the work is dedicated to the measurements taken with different types of electrical network faults and indirectly earthed transformer node via electrical inertia.

Key words: high voltage networks, earth fault, measurement evaluation, shunting

Zkratky a symboly

C_{01}, C_{02}, C_{03}	(F)	kapacita proti zemi v místě nesymetrie
C_{12}, C_{23}, C_{13}	(F)	kapacita mezi fázemi
C_k	(F.km ⁻¹)	kapacita na kilometr
C_{OS}	(F)	kapacita sítě proti zemi
C_{OV}	(F)	kapacita vývodu proti zemi
$\hat{I}_1, \hat{I}_2, \hat{I}_3$	(A)	fázory proudů systémového zdroje
$\hat{I}_{12}, \hat{I}_{23}, \hat{I}_{31}$	(A)	fázory kapacitních proudů tekoucí mezi fázemi
$\hat{I}_{C01}, \hat{I}_{C02}, \hat{I}_{C03}$	(A)	fázory proudů v místě nesymetrie
\hat{I}_0	(A)	fázor kapacitního proudu v místě nesymetrie
I_C	(A)	efektivní hodnota vlastního kapacitního proudu vedení
I_{CS}	(A)	efektivní hodnota celkového kapacitního proudu sítě
I_{CV}	(A)	efektivní hodnota celkového kapacitního proudu vývodu
\hat{I}_K	(A)	fázor kapacitního proudu soustavy
\hat{I}_{Kmin}	(A)	fázor nevykompenzované části kapacitního proudu
\hat{I}_L	(A)	fázor proudu tlumivkou
\hat{I}_{Lmin}	(A)	fázor nevykompenzované části proudu tlumivkou
\hat{I}_P	(A)	fázor poruchového proudu
\hat{I}_R	(A)	fázor činného proudu
\hat{I}_{RZT}	(A)	fázor činného proudu zhášecí tlumivkou
\hat{I}_{ZT}	(A)	fázor proudu zhášecí tlumivkou
I_{zts}	(A)	proud na sekundární straně zhášecí tlumivky
I_{ztp}	(A)	proud na primární straně zhášecí tlumivky
I_{nas}	(A)	efektivní hodnota nastaveného proudu
k_b	(-)	koeficient bezpečnosti ochrany
k_c	(-)	koeficient citlivosti ochrany
L	(H)	efektivní hodnota indukčnosti
L_N	(H)	regulovatelná indukčnost
l	(km)	délka vedení
P	(W)	efektivní hodnota činného výkonu
P_0	(W)	efektivní hodnota činného výkonu při zemním spojení
p_i	(-)	převod měřicího transformátoru proudu
R_0	(Ω)	svodový odpor vedení
R_P	(Ω)	odpor poruchy
R_N	(Ω)	odpor nulového odporníku
R_{ZT}	(Ω)	ztrátový odpor zhášecí tlumivky
\hat{U}_0	(V)	fázor napětí uzlu sítě v místě zdroje
$\hat{U}_{01}, \hat{U}_{02}, \hat{U}_{03}$	(V)	fázory fázových napětí v místě nesymetrie

$\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{U}_3$	(V)	fázory fázových napětí systémového zdroje
$\hat{U}_{12}, \hat{U}_{23}, \hat{U}_{31}$	(V)	fázory sdružených napětí systémového zdroje
U_f	(V)	efektivní hodnota fázového napětí zdroje
U_s	(V)	efektivní hodnota sdruženého napětí zdroje
U_{zts}	(V)	napětí na sekundární straně zhášecí tlumivky
U_{ztp}	(V)	napětí na primární straně zhášecí tlumivky
Q	(VAr)	efektivní hodnota jalového výkonu
ω	(rad.s ⁻¹)	úhlová frekvence

Obsah

1	ROZBOR SÍTÍ VN A POPIS ZEMNÍHO SPOJENÍ.....	1
1.1	ROZDĚLENÍ SÍTÍ VN.....	1
1.1.1	Sítě VN s izolovaným uzlem.....	1
1.1.2	Sítě VN s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost.....	2
1.1.3	Sítě VN s nepřímo uzemněným uzlem přes odpor.....	3
1.1.4	Sítě VN s nepřímo uzemněným uzlem přes Bauchův transformátor.....	4
1.1.5	Sítě VN s přímo uzemněným uzlem.....	4
1.2	ZEMNÍ SPOJENÍ.....	5
1.2.1	Izolovaná síť VN se zemním spojením.....	7
1.2.2	Síť VN s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost se zemním spojením.....	12
1.2.2.1	Kompenzační tlumivka.....	14
1.2.3	Odporově uzemněná síť s 1-pólovou zemní poruchou.....	16
1.2.4	Formulace problému zemního spojení.....	18
2	LOKALIZACE ZEMNÍHO SPOJENÍ V SÍTÍCH VN	19
2.1	ÚVOD.....	19
2.2	ROZDĚLENÍ ZPŮSOBŮ URČENÍ LOKALIZACE MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ.....	20
2.2.1	Lokalizace místa zemního spojení postupným vypínáním úseků.....	20
2.2.2	Lokalizace zemního spojení užitím indikátorů.....	20
2.2.3	Lokalizace zemního spojení kontrolou údržby.....	20
2.2.4	Lokalizace zemního spojení pomocí zkruhování sítě.....	20
2.2.5	Lokalizace místa zemního spojení s využitím napěťového kritéria.....	20
2.2.6	Lokalizace místa zemního spojení s využitím proudového kritéria.....	21
2.2.7	Lokalizace vývodu se zemním spojením.....	23
2.2.8	Lokalizace u sítě s izolovaným uzlem.....	23
2.2.9	Lokalizace u sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů.....	24
2.3	POPIS ZEMNÍCH OCHRAN	24
2.3.1	Zemní napěťová ochrana.....	24
2.3.2	Způsoby měření I_0 zemních směrových ochran.....	25
2.3.3	Principy zemních směrových ochran vedení.....	25
2.3.3.1	Wattmetrický princip P_0	25
2.3.3.2	Princip I_ϕ	25
2.3.3.3	Princip RG_0I_0	26
2.3.3.4	Systém Swedish Neutral.....	26
2.3.3.5	Systém dodatečně injektovaného diagnostického signálu.....	26
2.4	ZEMNÍ OCHRANY.....	27
2.4.1	Modul kombinované nadproudové a zemní ochrany SPCJ 4D29.....	27
2.4.2	Směrová ochrana proti zemnímu spojení RE 54.....	28
3	„ŠENTOVÁNÍ“ JAKO DIAGNOSTICKÁ METODA.....	29
3.1	PROCES ŠENTOVÁNÍ.....	30
3.2	PRAKTICKÁ MĚŘENÍ ŠENTOVÁNÍ	30
3.3	PŘÍNOS ŠENTOVÁNÍ.....	32
4	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ.....	33
4.1	POPIS MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ.....	33
4.2	POPIS MĚŘÍCÍ TECHNIKY	33

4.3	KOVOVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ - VYLADĚNÁ TLUMIVKA.....	35
4.4	KOVOVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ - ROZLADĚNÁ TLUMIVKA	39
4.5	ODPOROVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ (400Ω) - VYLADĚNÁ TLUMIVKA	41
4.6	ODPOROVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ (1600Ω) - VYLADĚNÁ TLUMIVKA	44
4.7	OBLOUKOVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ (JISKŘIŠTĚ) - VYLADĚNÁ TLUMIVKA	46
4.8	OBLOUKOVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ (KABEL) - VYLADĚNÁ TLUMIVKA	49
4.9	OBLOUKOVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ (KONZOLA) - VYLADĚNÁ TLUMIVKA.....	51
4.10	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	54
5	VYMEZENÍ METODY „ŠENTOVÁNÍ” PRO DIAGNOSTIKU ZEMNÍHO SPOJENÍ..	55
5.1	VYHODNOCENÍ	59
	ZÁVĚR.....	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	62

1 Rozbor sítí VN a popis zemního spojení

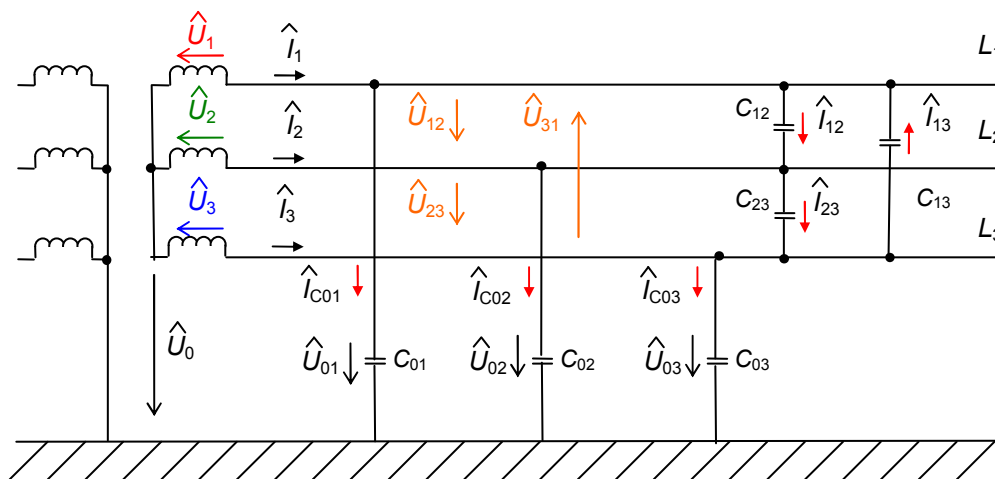
1.1 Rozdělení sítí VN

Většina distribučních rozvodů vysokého napětí je v ČR provozována s neúčinně uzemněným uzlem. Zde se jedná především o venkovní nadzemní třífázové rozvody bez zemního lana. Druh provozu sítě je dán především velikostí poruchového proudu, který vznikne při zemním spojení (blíže viz kapitola 1.2). V tabulce (Tab. 1-1) je zobrazena četnost výskytu poruch na vedeních vysokého napětí. Z číselného srovnání četnosti poruch je vidět, že jednofázové zemní spojení na VN je dominantní typ poruchy.

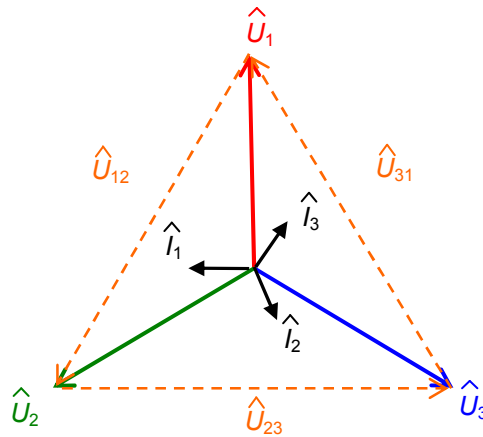
1.1.1 Sítě VN s izolovaným uzlem

V případě poruchy protéká místem zemního spojení poruchový proud, který je roven vektorovému součtu svodových odporů s celkovým zemním kapacitním proudem sítě. V místě zemního spojení pak dochází ke zvýšenému krokovému napětí. S ohledem na dále trvající zvýšené napětí v síti je nutno veškeré zařízení sítě dimenzovat na hodnotu sdruženého napětí sítě. Nebezpečné přepětí, které vzniká při přerušovaném zemním spojení může způsobit další poruchy i v místech značně vzdálených od primární poruchy. Obloukové zemní spojení má destruktivní účinky.

Sítě s izolovaným uzlem se používají převážně na hladině 6 kV v kabelových rozvodech. Při vzniku jednopólové poruchy v síti s izolovaným uzlem dosahuje zemní proud velkých hodnot a může se stát velmi nebezpečným jevem, a to jak z hlediska instalovaného zařízení, tak i z hlediska ohrožení zdraví a života osob.[1]



Obr. 1-1 Izolovaná síť VN



Obr. 1-2 Fázorový diagram sítě VN s izolovaným uzlem

Při popisu napěťových a proudových poměrů v nezatížené síti s izolovaným uzlem transformátoru je možné vycházet z předpokladu, že napájecí napětí zdroje jsou symetrické, kapacity proti zemi a kapacity jsou stejné, síť není zatížená odběrem a svodové odpory zanedbáme. Pro výše uvedené předpoklady lze pro napětí a proudy psát:

$$\begin{aligned} \hat{U}_{01} - \hat{U}_{12} - \hat{U}_{02} &= 0 & \hat{U}_{01} - \hat{U}_0 - \hat{U}_1 &= 0 \\ \hat{U}_{02} - \hat{U}_{23} - \hat{U}_{03} &= 0 & \hat{U}_{02} - \hat{U}_0 - \hat{U}_2 &= 0 \\ \hat{U}_{03} - \hat{U}_{12} - \hat{U}_{02} &= 0 & \hat{U}_{03} - \hat{U}_0 - \hat{U}_3 &= 0 \end{aligned} \quad (\text{r. 1-1})$$

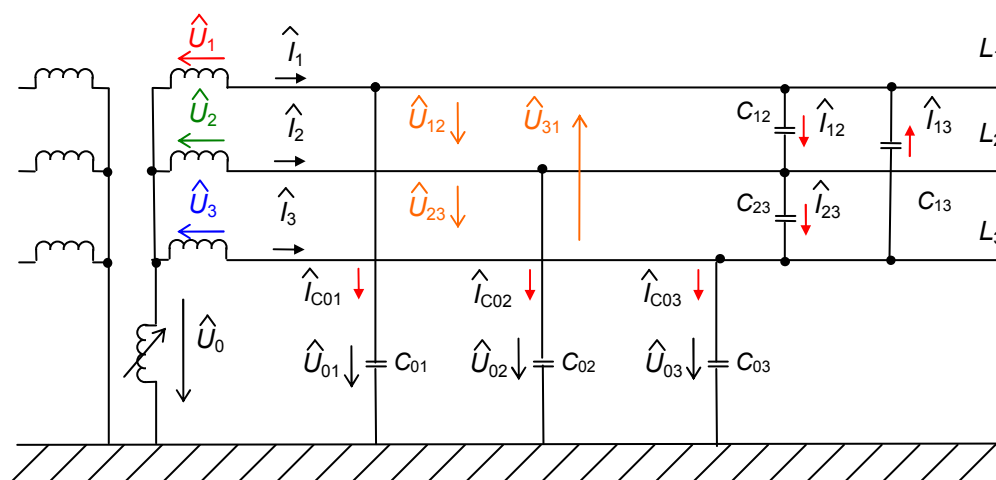
$$\begin{aligned} \hat{I}_1 &= \hat{I}_{C01} + \hat{I}_{12} - \hat{I}_{31} \\ \hat{I}_2 &= \hat{I}_{C02} + \hat{I}_{23} - \hat{I}_{12} \\ \hat{I}_3 &= \hat{I}_{C03} + \hat{I}_{31} - \hat{I}_{23} \end{aligned} \quad \text{kde} \quad \begin{aligned} \hat{I}_{C01} &= j\omega C_{01} \hat{U}_{01} \\ \hat{I}_{C02} &= j\omega C_{02} \hat{U}_{02} \\ \hat{I}_{C03} &= j\omega C_{03} \hat{U}_{03} \end{aligned} \quad (\text{r. 1-2})$$

$$\begin{aligned} \hat{U}_{01} + \hat{U}_{02} + \hat{U}_{03} &= \hat{U}_0 \\ \hat{I}_{01} + \hat{I}_{02} + \hat{I}_{03} &= \hat{I}_0 \end{aligned} \quad (\text{r. 1-3})$$

1.1.2 Sítě VN s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost

Většina sítí 22 kV je provozována s kompenzací kapacitních zemních proudů, proto se jim říká sítě kompenzované. Tento způsob provozu se užívá jak ve venkovních, tak i v sítích kabelových. Princip spočívá v tom, že mezi uzlem napájecího transformátoru a zemí je zapojená proměnná indukčnost – zhašecí Petersenova tlumivka (zhašecí tlumivka), která je naladěná tak, aby při vzniku zemního spojení protékal touto tlumivkou stejný jalový proud, jako kapacitní proud sítě, ale s opačným směrem. V místě zemního spojení dochází k vektorovému součtu těchto dvou proudů a k jeho proudovému odlehčení, které způsobí zhasnutí oblouku. Při absolutním vyladění zhašecí tlumivky bude protékat místem poruchy pouze zbytkový proud, který se skládá ze svodového proudu sítě, zkratového proudu zhašecí tlumivky a proudů vyšších harmonických. Kompenzací kapacitních zemních proudů se docílí, že místem zemního spojení protéká jen malý proud, takže

nedochází k větším škodám. Kompenzovaný způsob provozu sítě, umožňuje provozovat vedení se zemním spojením po dobu potřebnou k nalezení místa zemního spojení, takže doba přerušení dodávky je velmi krátká.[4]



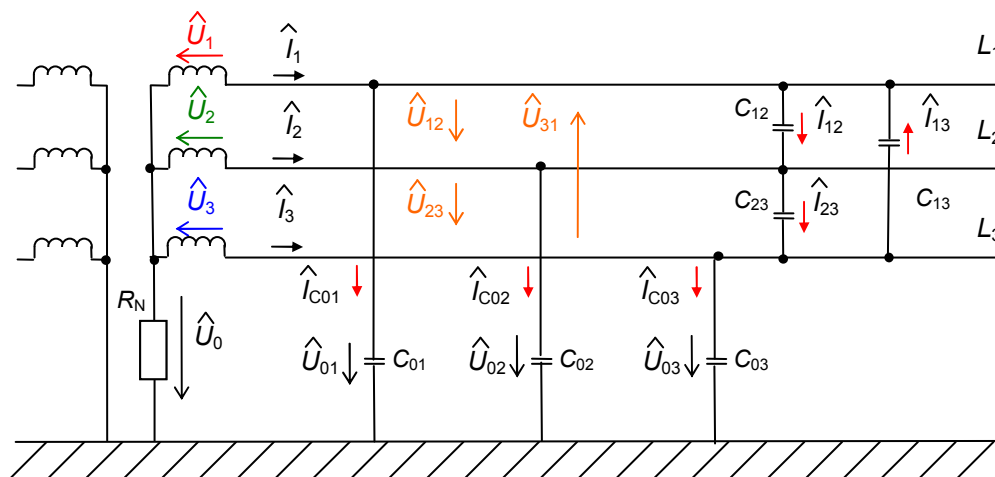
Obr. 1-3 Síť VN nepřímě uzemněná přes indukčnost

1.1.3 Sítě VN s nepřímě uzemněným uzlem přes odpor

Sítě VN mohou být provozovány s uzlem spojeným přes činný odpor, kde je povolen maximální jednopólový zkratový proud u venkovních a smíšených sítí 300 A, u kabelových sítí 1000 A [8]. Spojení fáze se zemí je jednopólovým tlumeným zkratem. Vzhledem k velikosti vypínaných proudů Spojení fáze se zemí je jednopólovým tlumeným zkratem. Vzhledem k velikosti vypínaných proudů musí následovat okamžité vypnutí chráněno úseku. Síť není možné provozovat se zemním spojením jako u kompenzovaných sítí. Odporové uzemnění uzlu transformátoru se používá na všech hladinách napětí kabelových VN sítí.

Při vzniku jednopólové poruchy „zkratu“ v síti poklesne napětí na postižené fázi (až na 0), zatímco na uzlu transformátoru se zvýší téměř na hodnotu fázového napětí. Místem poruchy při jednopólovém zkratu protéká vektorový součet proudů odporu a kapacitního proudu sítě. Jeho velikost je závislá na velikosti odporníku a rozsahu napájecí sítě. Odpor zapojení do uzlu transformátoru omezí velikost zkratového proudu, zmenší hodnotu dotykových napětí a působí příznivě na tlumení přepětíových jevů. To má za následek snížení následných poruch, neboť sítě jsou vypínány již při jednopólové zemní poruše, tím dochází k snížení namáhání izolace zařízení VN. Poruchovost u sítí s uzlem uzemněným přes činný odpor je několikanásobně menší než u sítí provozovaných pře zhašecí tlumivku. U těchto sítí nedochází k vícenásobným nebo přerušovaným poruchám. Zmenší se počet mezifázových zkratů, poněvadž nedojde k propálení izolace kabelu.

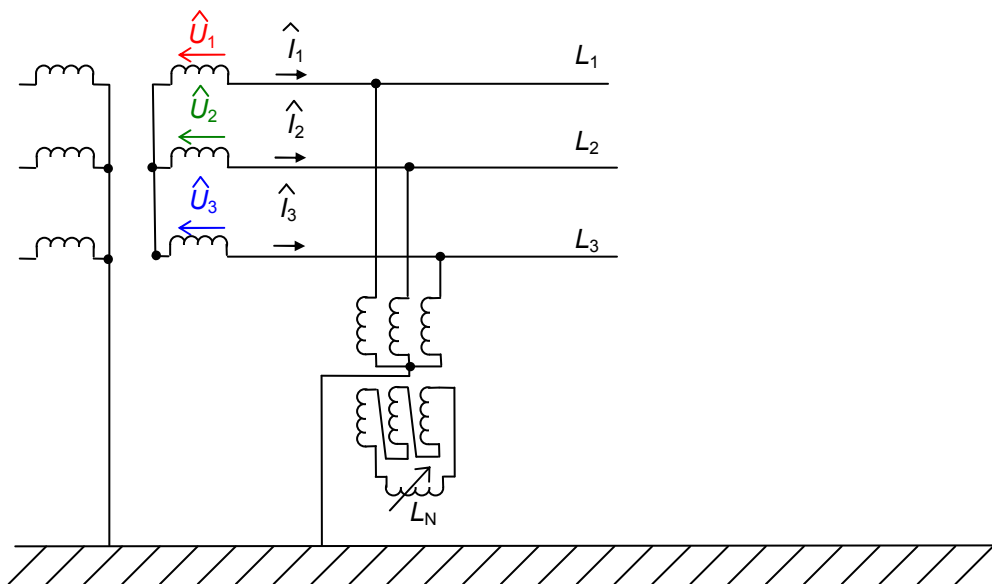
Nevýhodou uzemněného uzlu přes činný odpor v distribuční soustavě je okamžité vypnutí chráněného úseku.[10]



Obr. 1-4 Odporově uzemněná síť VN

1.1.4 Sítě VN s nepřímo uzemněným uzlem přes Bauchův transformátor

Bauchův zhášecí transformátor je na (Obr. 1-5) se skládá z primárního vinutí spojeného do hvězdy a připojeného paralelně k vývodům generátoru a ze sekundárního vinutí spojeného do trojúhelníka, který se uzavírá přes vloženou regulovatelnou indukčnost LN. Bauchův transformátor plní stejnou funkci jako Petersenova tlumivka, ale jeho výhodou je, že zkratové proudy neprocházejí vinutím generátoru. Jeho nevýhodou jsou náklady na jeho pořízení, což zapříčinilo jeho rozšíření v praxi.[2]



Obr. 1-5 Síť VN s nepřímo uzemněným uzlem přes Bauchův transformátor

1.1.5 Sítě VN s přímo uzemněným uzlem

Tyto sítě se v České republice v distribuční soustavě VN nepoužívají, protože odpovídající proudy jednopólových zkratů u našich obvyklých transformátorů 110 kV/VN dokonce přesahují proudy zkratů třífázových, jsou nepřijatelné jak s ohledem na ochranu před nebezpečným dotykem,

ovlivnění sdělovacích vedení, tak rozsah poškození v místě poruchy (plášť kabelů apod.).[6]

1.2 Zemní spojení

Vodivé spojení jedné fáze se zemí je v soustavách s přímo uzemněným uzlem nazýváno jednofázovým zkratem. V soustavách s uzlem izolovaným nebo nepřímo uzemněným se tato porucha označuje jako zemní spojení. Ve všech ostatních variantách (účinně uzemněný uzel, uzel spojený se zemí přes odpor nebo při spojení více fází) se jedná o zkrat. Zásadní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je ve velikosti charakteru poruchového proudu.

Zatímco v případě jednofázového zkratu se jedná o proud induktivní, jehož velikost je několikanásobně větší než provozní proud, v místě zemního spojení protéká jen malý proud kapacitního charakteru odpovídající kapacitám vodičů proti zemi. Soustavu lze nadále provozovat s tím, že napětí proti zemi ve fázích bez poruchy dosáhne hodnoty napětí sdruženého. Proto se sítě VN dimenzují na hodnotu sdruženého napětí.

V distribučních sítích VN se uzemnění uzlu provádí převážně přes zhášecí tlumivku – jsou to sítě kompenzované provozovány na napěťové hladině 22 kV. Výjimkou jsou malé sítě, např. sítě některých průmyslových závodů, vlastních spotřeb tepláren a elektráren, které jsou provozovány na napěťové hladině 6 kV a s izolovaným uzlem. Kabelové sítě VN, např. ve městech, mohou být provozovány s uzlem uzemněným přes činný odpor.[4]

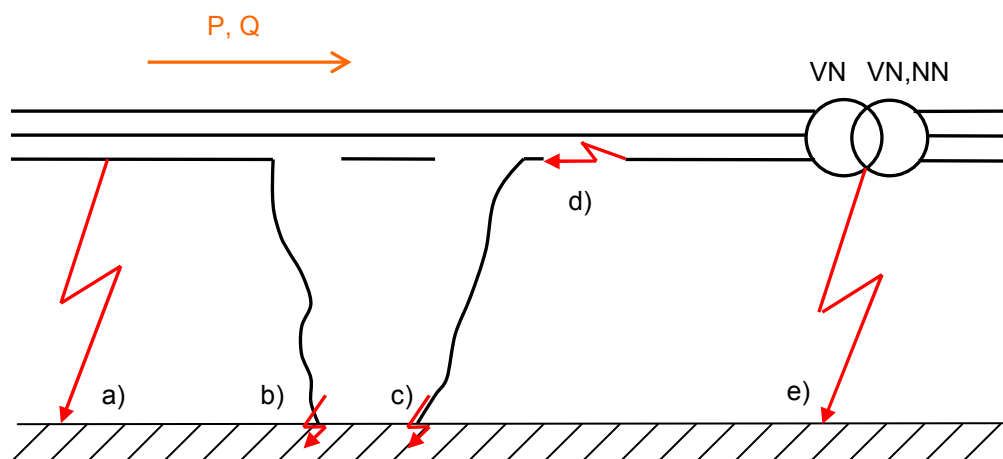
Druhy zemních spojení

podle velikosti přechodového odporu v místě poruchy

- kovová (0Ω)
- oblouková (několik Ω)
- odporová (několik set Ω až tisíc Ω)

podle doby trvání

- mžiková (do 0,5s)
- krátkodobá (do 5 min)
- přerušovaná (opakovaná mžiková nebo krátkodobá porucha)
- trvalá (až několik hodin, do doby odstranění poruchy)



Obr. 1-6 Jednotlivé typy poruch na vedení VN, které způsobují zemní spojení

Na (Obr. 1-6) jsou zobrazeny nejčastěji se vyskytující poruchy na vedeních VN. Tyto poruchy lze kvalifikovat následovně:

- a) zemní spojení vodiče bez přerušení toku elektrické energie, způsobené např. průrazem izolátoru nebo dotykem vodiče o strom,
- b) zemní spojení ve směru toku energie s přerušením dodávky elektrické energie v jedné fázi za místem poruchy, tvořené přetrženým vodičem spadlým na zem,
- c) zemní spojení proti směru toku energie s přerušením dodávky elektrické energie v jedné fázi za místem poruchy, tvořené přetrženým vodičem spadlým na zem,
- d) přerušení vodiče jedné fáze (nejedná se přímo o jev zemního spojení, svými vnějšími účinky na napěťovou nesymetrii systému se však může v některých případech podobat účinkům při zemním spojení),
- e) zemní spojení vyvolané izolační poruchou v transformátoru.

Při vzniku zemního spojení je možné síť provozovat po určitou dobu bez přerušení dodávky elektrické energie, aniž by bylo ovlivněno napětí v síti NN u spotřebitelů. Je to na dobu nezbytnou k vyhledání zemního spojení. Zemní spojení nastává častěji v sítích s venkovním vedením než s vedením kabelovým. Při přechodném zemním spojení příčina poruchy po určité době zmizí. Pro venkovní vedení je tedy výhodnější provoz se zhášecí tlumivkou, protože zhášecí tlumivka snižuje proud v místě poruchy, což umožňuje po dobu trvání zemního spojení příznivější podmínky pro provozované zařízení a při přechodném zemním spojení oblouk snadněji zhasíná.

Zemní spojení je nutno považovat za nežádoucí stav, jehož odstranění je zapotřebí provést jak s ohledem na nebezpečí ohrožení osob v okolí místa poruchy, tak i na možnost následných poruch.[4]

Orientační hodnoty kapacitních proudů (I_C):

I_C venkovních vedení 35 kV je kolem 100 mA / km délky

I_C venkovních vedení 22 kV je kolem 63 mA / km délky

I_C kabelů 22 kV je kolem 4 A / km délky

I_C kabelů 10 kV je kolem 2,5 A / km délky

I_C kabelů 6 kV je kolem 2 A / km délky

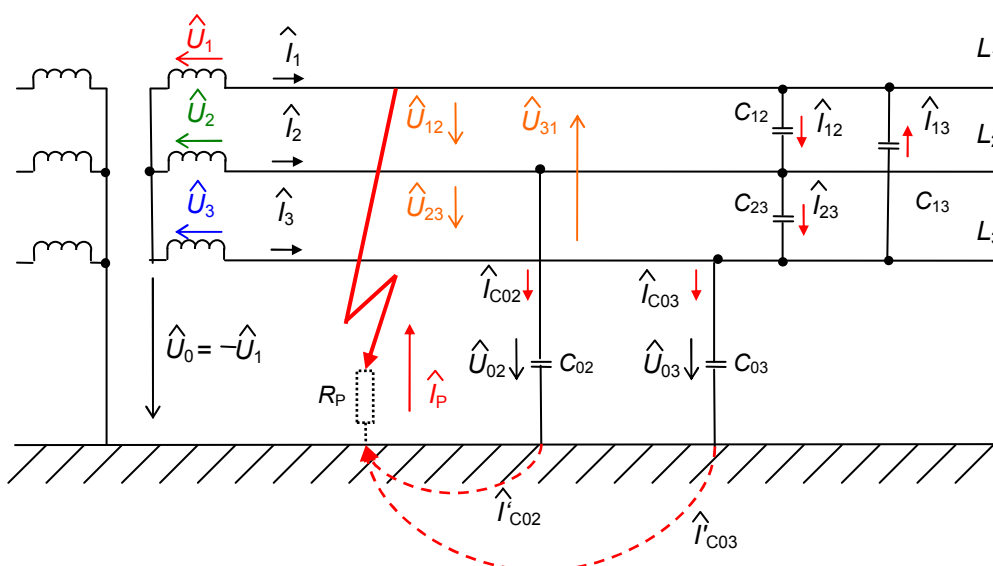
Pozn. Přesné hodnoty kapacitních proudů lze získat od výrobce nebo měřením.

Druh poruchy	Pravděpodobnost výskytu poruchy v (%)		
	VN (10, 22, 35 kV)	VVN (110 kV)	VVN (220 kV)
3 – fázový zkrat	5	0,6	0,9
2 – fázový zkrat	10	4,8	0,6
2 – fázový zemní zkrat	20	3,8	5,4
1 – fázový zemní zkrat	65	91	93,1

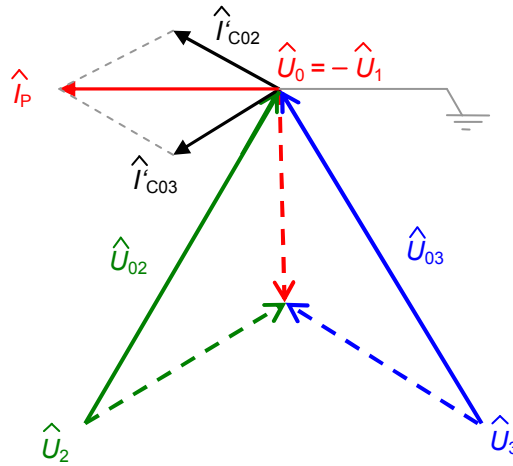
Tab. 1-1 Pravděpodobnost výskytu poruchy na vedeních[3]

1.2.1 Izolovaná síť VN se zemním spojením

V izolované síti je poruchový proud dán součtem kapacitních proudů zdravých fází, tzn. že místem zemního spojení bude protékat kapacitní proud, jehož hodnota závisí na rozsahu sítě, to je na velikosti kapacit C_0 zdravých fází.



Obr. 1-7 Zemní spojení v síti s izolovaným uzlem



Obr. 1-8 Fázorový diagram kovového zemního spojení v izolované síti ($R_p \rightarrow 0 \Omega$)

S izolovaným uzlem nelze provozovat příliš velké sítě (velká hodnota C_0), protože kapacitní proud poruchy je pak příliš velký a vznikají problémy jak s jeho vypínáním, tak i s rostoucími úbytky napětí na zemničích během poruchy. Komplikace mohou také nastat při přerušovaném zemním spojení, při kterém nestabilně hoří elektrický oblouk mezi porušenou fází a zemí, a kdy uhasínání a opětovné zapalování oblouku může v síti s izolovaným nulovým bodem způsobit značná přepětí.

Předpokládáme symetrickou síť:

$$C_{01} \approx C_{02} \approx C_{03} \approx C_0$$

Pro velikosti napětí lze napsat:

$$\begin{aligned} \hat{U}_{01} &= 0 \\ \hat{U}_{02} &= \hat{U}_2 + \hat{U}_0 = \hat{U}_2 - \hat{U}_1 = \hat{U}_{21} \\ \hat{U}_{03} &= \hat{U}_3 + \hat{U}_0 = \hat{U}_3 - \hat{U}_1 = \hat{U}_{31} \\ \hat{U}_0 &= -\hat{U}_1 \end{aligned} \quad (\text{r. 1-4})$$

Pro velikost proudu lze napsat:

$$\begin{aligned} \hat{I}_p &= \hat{I}'_{c02} + \hat{I}'_{c03} = j\omega C_0(\hat{U}_{02} + \hat{U}_{03}) = -3j\omega C_0\hat{U}_{01} = -3\hat{I}'_{c01} \\ \hat{I}'_{c02} &= j\omega C_0\hat{U}_{02} = -j\omega C_0\hat{U}_{23} = \sqrt{3}\hat{I}_{c02} \\ \hat{I}'_{c03} &= j\omega C_0\hat{U}_{03} = -j\omega C_0\hat{U}_{31} = \sqrt{3}\hat{I}_{c03} \end{aligned} \quad (\text{r. 1-5})$$

Kapacita se v praxi udává na kilometrovou délku. Kapacitu vedení C_0 a poruchový proud I_p lze zjednodušeně vyjádřit vztahem:

$$C_0 = C_{k0} \cdot l$$

$$I_P = 3\omega C_{k0} \cdot l \cdot U_f = \sqrt{3}\omega C_{k0} \cdot l \cdot U_S$$

(r. 1-6)

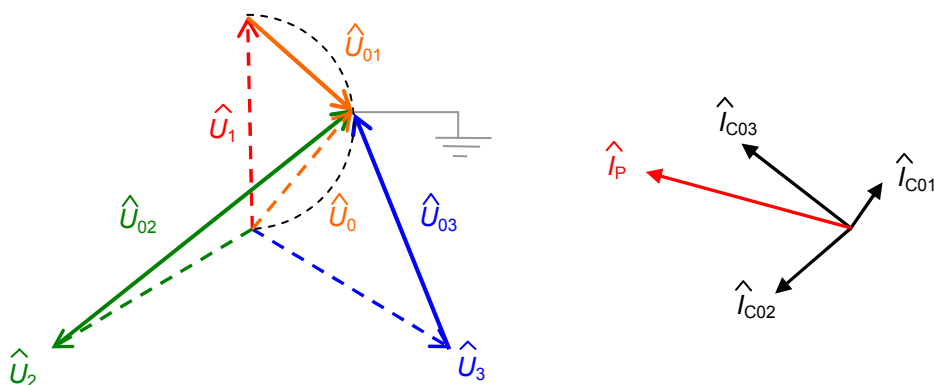
Za předpokladu kovového zemního spojení s $R_P \rightarrow 0 \Omega$ lze konstatovat:

- kapacitní proud postižené fáze vzroste 3 krát,
- kapacitní proudy zdravých fází vzrostou o $\sqrt{3}$ krát,
- napětí na uzlu transformátoru vzroste na fázovou hodnotu systému,
- napětí zdravých fází proti zemi vzroste na sdruženou hodnotu systému.

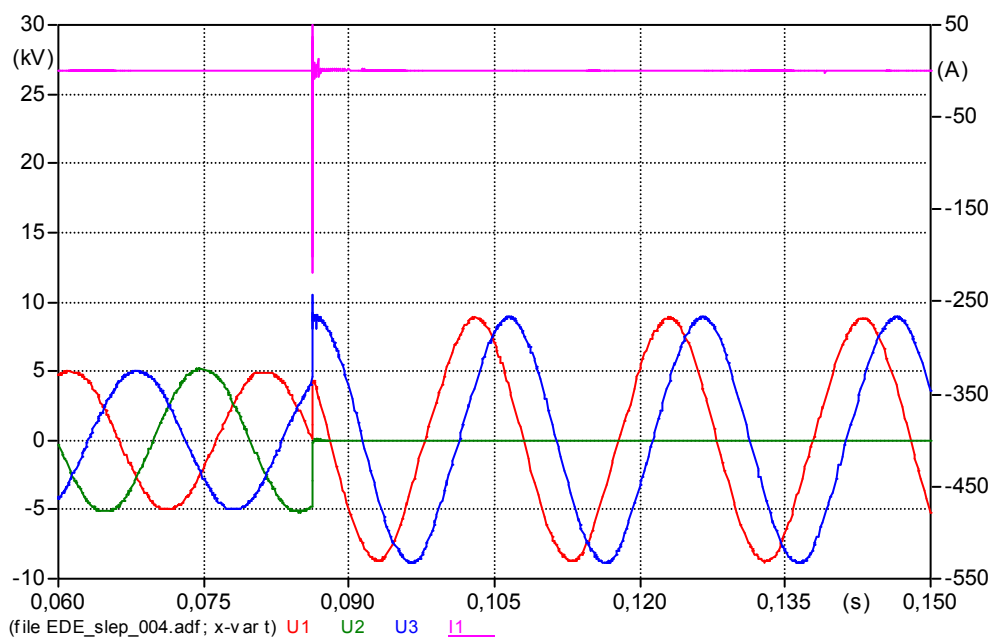
Kovové zemní spojení s nulovým přechodným odporem se vyskytuje zřídka a zpravidla se vždy přechodný odpor vyskytne a poruchový proud I_P je dán vztahem:

$$I_P = \frac{I_C}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_C}{U_f} \cdot R_P \right)^2}}$$

(r. 1-7)

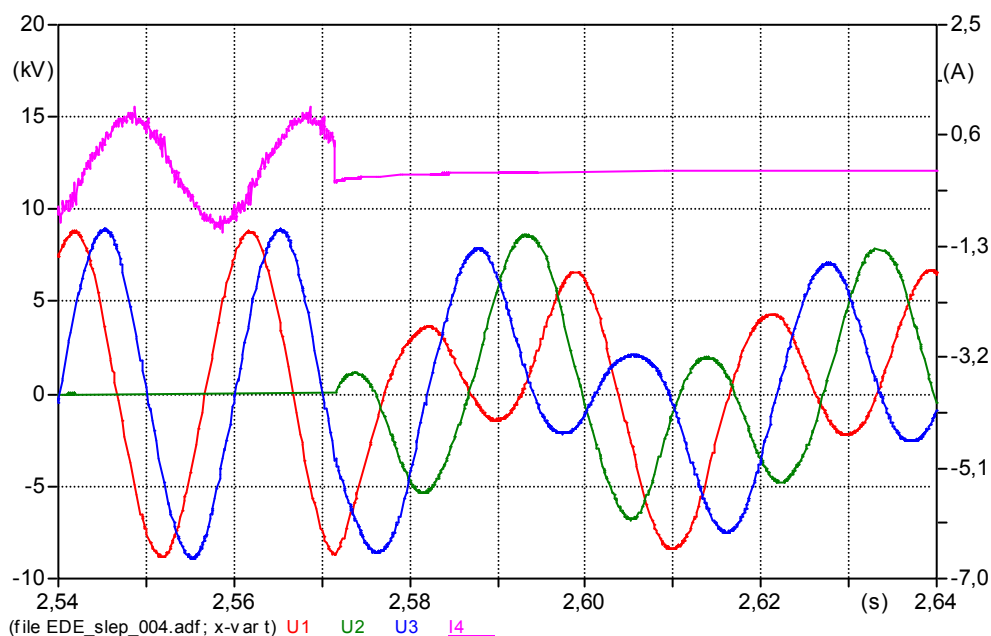


Obr. 1-9 Fázorový diagram zemního spojení v izolované síti ($R_P \neq 0 \Omega$)



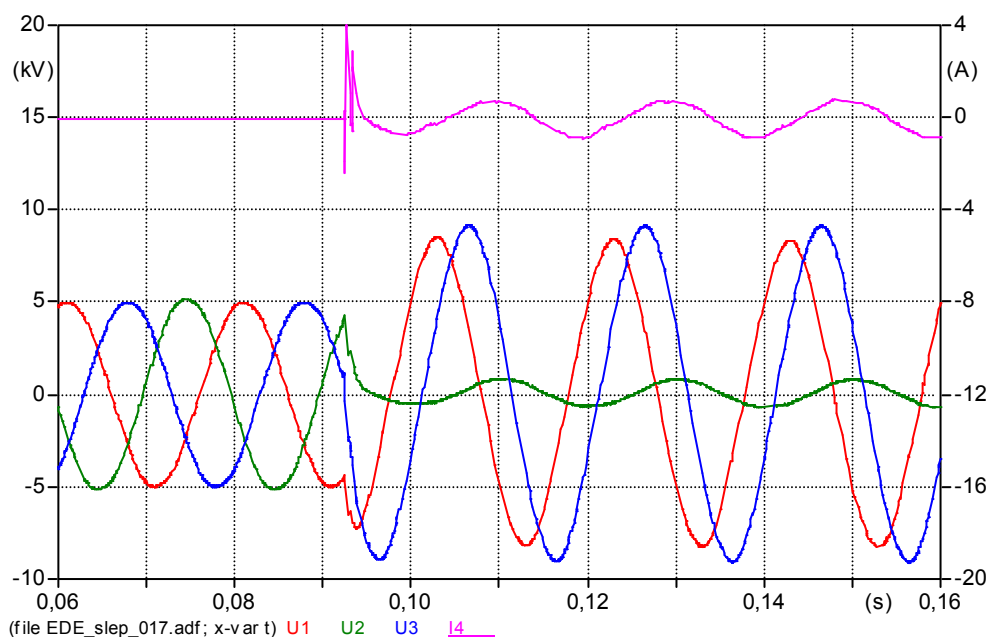
Obr. 1-10 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1f} , U_{2f} , U_{3f} (kV) a kapacitního proudu I_1 (A) v okamžiku vzniku zemního spojení ($R_p \rightarrow 0 \Omega$)

(Zdroj: Měření kapacity sítě 6 kV na VB3 Elektrárny Dětmorovice)



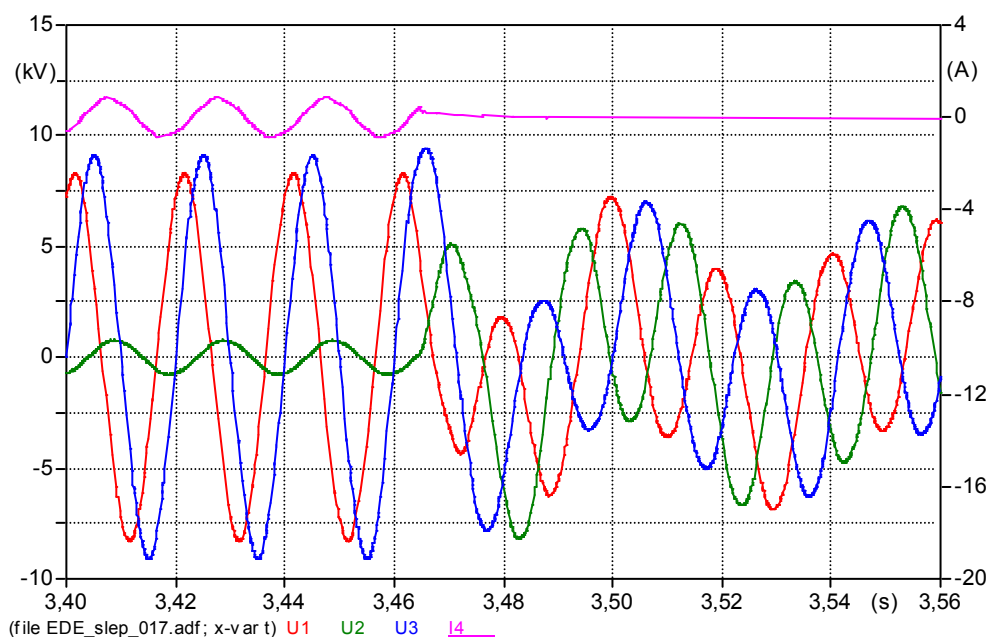
Obr. 1-11 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1f} , U_{2f} , U_{3f} (kV) a kapacitního proudu I_1 (A) v ustáleném stavu a po ukončení zemního spojení ($R_p \rightarrow 0 \Omega$)

(Zdroj: Měření kapacity sítě 6 kV na VB3 Elektrárny Dětmorovice)



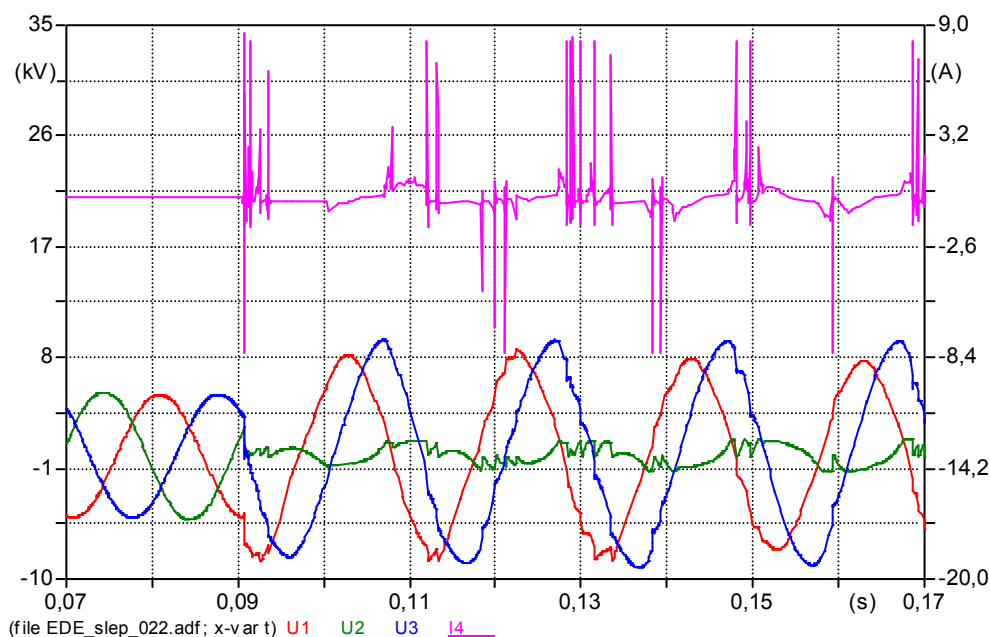
Obr. 1-12 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1f} , U_{2f} , U_{3f} (kV) a kapacitního proudu I_1 (A) v okamžiku vzniku zemního spojení ($R_p \rightarrow 800 \Omega$)

(Zdroj: Měření kapacity sítě 6 kV na VB3 Elektrárny Dětmorovice)



Obr. 1-13 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1f} , U_{2f} , U_{3f} (kV) a kapacitního proudu I_1 (A) v ustáleném stavu a po ukončení zemního spojení ($R_p \rightarrow 800 \Omega$)

(Zdroj: Měření kapacity sítě 6 kV na VB3 Elektrárny Dětmorovice)



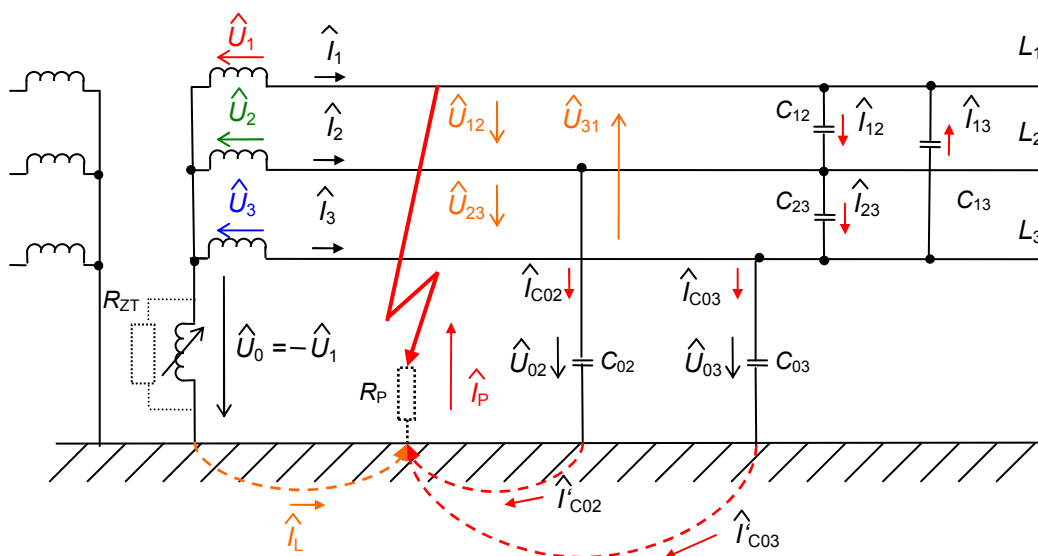
Obr. 1-14 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1f} , U_{2f} , U_{3f} (kV) a kapacitního proudu I_1 (A) v okamžiku vzniku obloukového zemního spojení

(Zdroj: Měření kapacity sítě 6 kV na VB3 Elektrárny Dětmorovice)

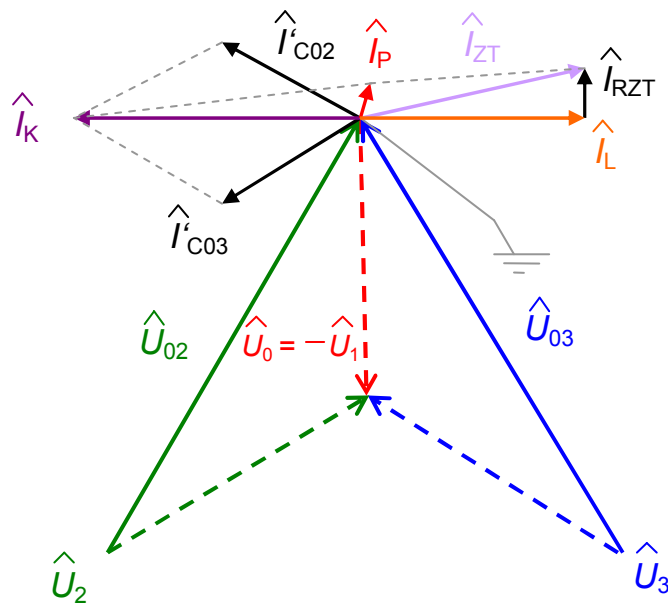
1.2.2 Sít' VN s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost se zemním spojením

Omezení kapacitních proudů zemních spojení se řeší uzemněním nulového bodu transformátoru přes tlumivku. Touto tlumivkou prochází při zemním spojení induktivní proud a uzavírá se přes místo zemního spojení s poškozenou fází. Induktivní proud má v místě zemního spojení opačný směr, takže kapacitní proud se zdravých fází je kompenzován. Zemním spojením pak prochází jen tzv. zbytkový proud, jehož hodnota závisí na indukčnosti tlumivky.

Při vhodné velikosti tlumivky je zbytkový proud malý a vzniklý elektrický oblouk zemního spojení rychle uhasíná. Proto se takto použité tlumivky nazývají zhášecí tlumivky. Rozhodujícím faktorem pro vypnutí je teplota zhášecí tlumivky, která nesmí překročit dovolenou hodnotu.



Obr. 1-15 Zemní spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost



Obr. 1-16 Fázorový diagram zemního spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indučnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$)

Velikost poruchového proudu je dána ohmickým odporem zhášecí tlumivky R_{ZT} a vedením VN spolu se svodovými odpory R_0 . Poruchový proud můžeme popsat takto:

$$\hat{I}_p = \frac{U_f \cdot \sqrt{1 + R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)^2}}{\sqrt{(R_p + R_0)^2 + R_p^2 R_0^2 \left(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L} \right)^2}} \quad (\text{r. 1-8})$$

Při dokonalém kovovém zemním spojení je napětí na uzlu $\hat{U}_0 = -\hat{U}_1$ a proud tekoucí ideální zhášecí cívkou bude:

$$\hat{I}_L = -j \frac{\hat{U}_0}{\omega L} \quad (\text{r. 1-9})$$

Při vhodné velikosti předem nastavené indukčnosti dojde k úplné kompenzaci kapacitních zemních proudů I_C :

$$-j \frac{\hat{U}_0}{\omega L} = 3j\omega C_0 \hat{U}_0 \quad (\text{r. 1-10})$$

Lze odvodit potřebnou velikost ideální zhášecí cívky pro úplnou kompenzaci zemního kapacitního proudu.

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_0} \quad (\text{r. 1-11})$$

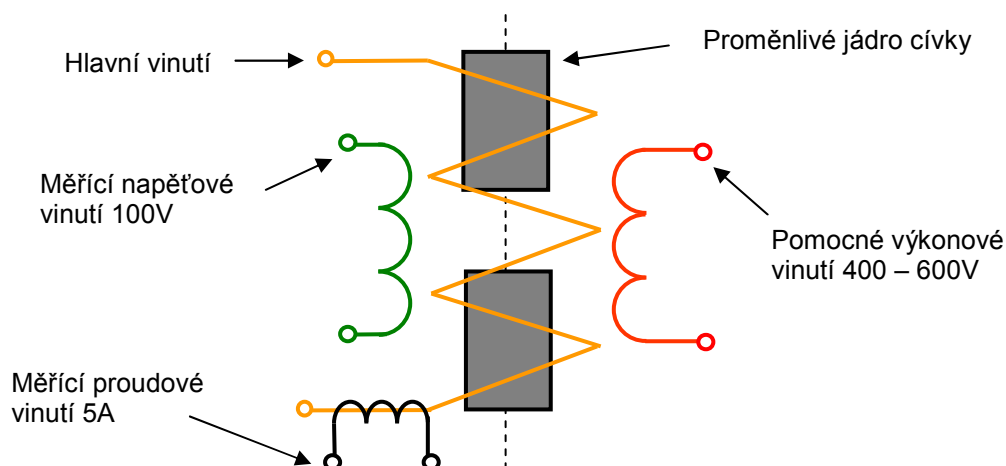
Při ideální kompenzaci neteče místem poruchy žádný proud, neudrží se oblouk. Při skutečných poměrech zůstává v místě poruchy zbytkový proud, který obsahuje jednak nevykompenzovaný proud nepřesného nastavení indukčnosti, jednak nevykompenzovanou činnou složku odpovídající ztrátám na zhášecí tlumivce a svodovým odporům fáze proti zemi a proudy vyšších harmonických. Poruchový proud je tedy u dobře vyladěné kompenzované sítě jednak mnohem nižší než kapacitní proud sítě. Pokud je tento proud nižší než 5 A, dojde k samovolnému uhašení oblouku vlivem deionizace jeho dráhy.[4]

Norma [9] doporučuje kompenzační zhášecí tlumivku použít již od velikosti kapacitního proudu sítě 10 A a při proudech nad 20 A je kompenzace sítě nezbytná. Zbytkový proud v místě zemního spojení by neměl převyšovat hodnotu 60 A. Kompenzované sítě se pak mohou provozovat s maximálním kapacitním proudem 100 A u venkovních sítí, 300 A u smíšených sítí a 450 A u sítí kabelových.

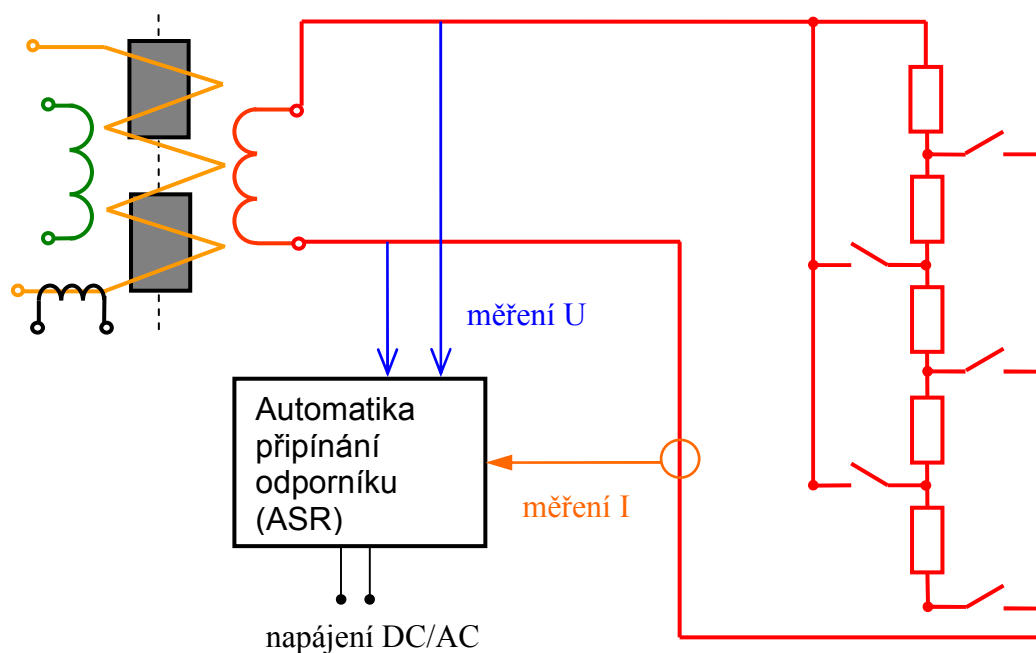
1.2.2.1 Kompenzační tlumivka

Konstrukční provedení kompenzační tlumivky (Obr. 1-17) si lze představit jako transformátor s regulací proudu naprázdno. Nastavení indukčnosti se provádí změnou mezery v magnetickém obvodu tlumivky. Výstupní napětí na pomocném výkonovém vinutí zhášecí tlumivky je vlivem mezery v magnetickém obvodu relativně měkké. Pomocné výkonové vinutí se dimenzuje od 10 do 30% jmenovitého výkonu tlumivky a slouží k připojení pomocného odporníku.

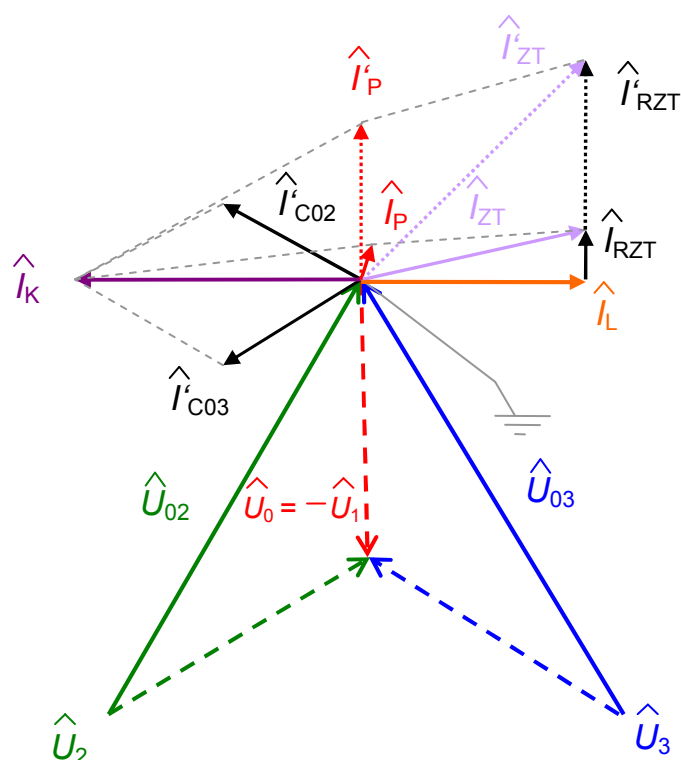
Připojení odporníku (Obr. 1-18) do pomocného výkonového vinutí zajistí zvýšení činné složky proudu (Obr. 1-19) na postiženém vývodu a zvýší se citlivost a spolehlivost ochran. Odporník se připojuje se zpožděním 1s po vzniku zemního spojení na dobu 1s.



Obr. 1-17 Konstrukce zhášecí Petersenovy tlumivky



Obr. 1-18 Schéma připojení odporů do pomocného výkonového vinutí kompenzační tlumivky



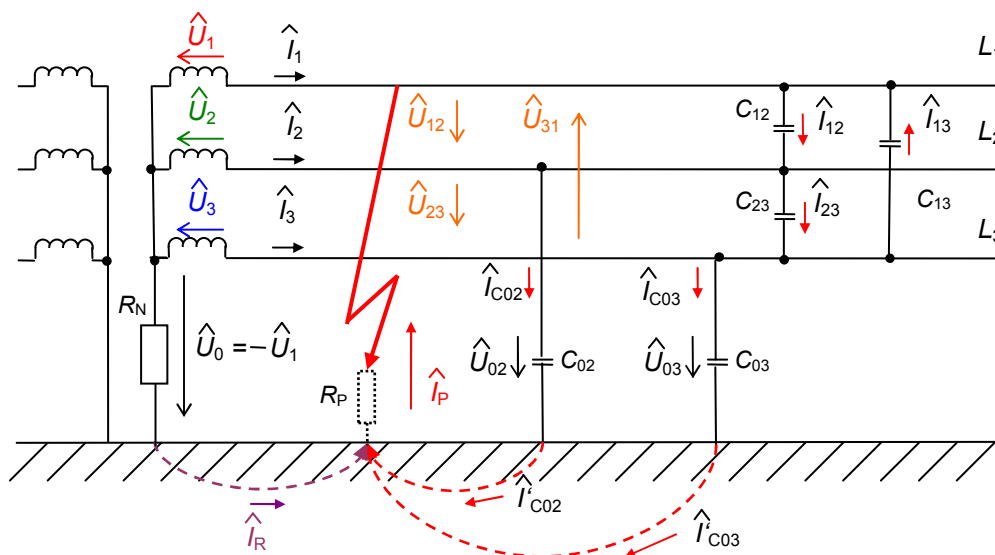
Obr. 1-19 Fázorový diagram pro síť s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$) po připojení odporů

Odporník pro krátkodobé zvýšení činné složky poruchového proudu respektuje proměnlivou velikost odporu zemního spojení a použitých zemních ochran. Je vybaven automatikou (ASR) pro výběr vhodné velikosti připínaného odporu do pomocného výkonového vinutí zhášecí tlumivky. Velikost odporu se volí podle odporu zemního spojení a nastavení zemních ochran.[8]

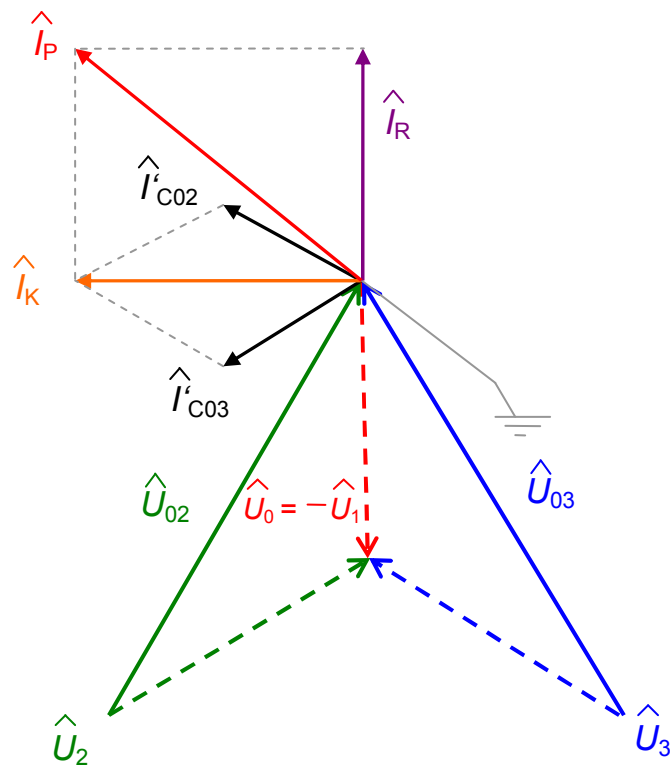
1.2.3 Odporově uzemněná síť s 1-pólovou zemní poruchou

Kabelové sítě VN např. ve městech mohou být provozovány s uzlem uzemněným přes činný odpor. Důvodem je obvykle překročení mezí kapacitního proudu sítě uvedených pro kompenzovanou síť. Odpor v uzlu omezuje proudy při 1-pólové zemní poruše (zkratu) oproti účinně uzemněné. Odpor zapojený v uzlu transformátoru navíc tlumí přepětí vznikající při zemních poruchách.

Tuto síť ovšem nejde provozovat při jednopólovém zemním spojení, protože se v tomto případě jedná o jednofázový zkrat, který musí být v krátkém čase vypnut. Proto tento způsob ošetření nulového bodu transformátoru přichází v úvahu právě u kabelových sítí, kde při zkratu může dojít k samočinnému uhašení oblouku, pevná izolace kabelu se poškodí a je nutné ji opravit.



Obr. 1-20 1-pólová porucha v síti VN s odporově uzemněným uzlem



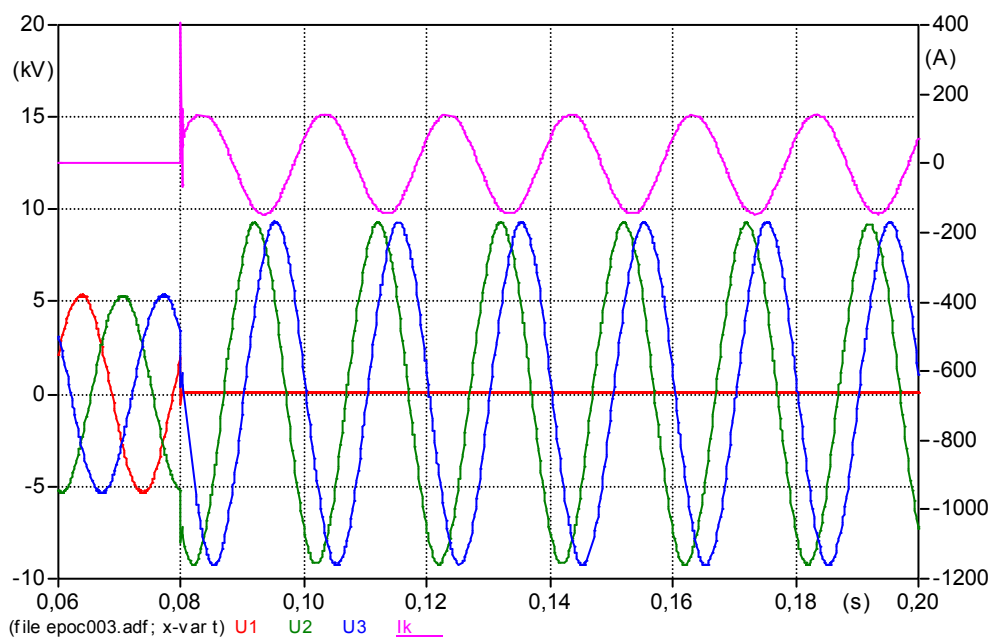
Obr. 1-21 Fázorový diagram s kovovou zemní poruchou v síti s odporově uzemněným uzlem ($R_p \rightarrow 0 \Omega$)

Poruchový proud v odporově uzemněné síti můžeme popsat takto:

$$\hat{I}_p = \frac{U_f \sqrt{1 + (R_N \cdot 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_p + R_N)^2 + (R_p \cdot R_N \cdot 3\omega C_0)^2}} \quad (\text{r. 1-12})$$

V případě, kdy je reaktance zemnicích kapacit větší než zemnicí odpor, můžeme vzorec (r. 1-12) zjednodušit:

$$\hat{I}_p = \frac{U_f}{R_N + R_p} \quad (\text{r. 1-13})$$



Obr. 1-22 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1f} , U_{2f} , U_{3f} (kV) a kapacitního proudu I_k (A) v okamžiku vzniku zemního spojení ($R_p \rightarrow 0 \Omega$)

(Zdroj: Simulace zemního zkratu v elektrárně Počerady)

1.2.4 Formulace problému zemního spojení

Volba uzemnění uzlu v sítích VN má pro provozovatele sítě velký význam a je předmětem různých studií a ověřování. Kritéria pro posouzení různých metod uzemnění uzlu sítě vycházejí z chování sítě při zemním spojení a jsou následující:

- důsledky poruchového proudu – velikost dotykového a krokového napětí, co nejmenší poškození v místě poruchy
- provozní aspekty – automatická, rychlá a selektivní lokalizace poruchy bez velkého rozsahu manipulací v síti, žádné následné rozšíření poruchy a malé ovlivnění sousedních vedení
- spolehlivost dodávky elektrické energie – odstranit poruchu bez přerušení dodávky elektrické energie nebo alespoň minimalizovat dobu přerušení

Výše uvedené požadavky jsou nejlépe splněny v případě kompenzovaných sítí s možností rychlé lokalizace zemního spojení. V důsledku minimalizování poruchových proudů vlivem kompenzace se však komplikuje lokace poruchy a je více nejistá, než u sítí s izolovaným uzlem nebo odporově uzemněným uzlem. To přináší řadu problémů s včasným odstraněním trvalých zemních spojení, kdy výhoda zhasnutí zemního spojení má smysl jen pro přechodná zemní spojení u venkovních vedení, protože po odstranění poruchy je izolace opět intaktní, zatímco v kabelových sítích mohou zůstat slabá místa v izolaci a je nutné přezkoušení a přeměření kabelů. Z hlediska provozní spolehlivosti je tedy nezbytná rychlá a selektivní lokalizace poruchy.[4]

V současné době se používá řada metod pro identifikaci a následnou eliminaci zemního spojení v kompenzovaných sítích z nichž některé jsou uvedeny v následující kapitole.

2 Lokalizace zemního spojení v sítích VN

2.1 Úvod

Zemní spojení je vždy signalizované jedním z těchto vznikajících jevů:

- snížení napětí některé fáze vůči zemi a to dokonce až na nulu
- zvýšení napětí na zdravých fázích a to dokonce až na hodnotu sdruženého napětí
- vznik napětí mezi uzlem transformátoru a zemí a z toho důvodu, že geometrický součet
- vektorů jednotlivých fází již není nula
- vznik proudu v zemním vodiči a z toho důvodu, že výsledný součet proudů již není nula
- vznik nulové složky napětí, jež je měřena na sekundární straně měřicího transformátoru napětí, jehož vinutí je zapojeno do otevřeného trojúhelníka

U kompenzované sítě, ve které došlo k zemnímu spojení, se musí okamžitě začít s vyhledáváním, jak vývodu tak i místa, kde vzniklo zemní spojení. Kompenzované sítě se mohou ponechat po určitou dobu v provozu, než se provede vypnutí postiženého úseku se zemním spojením. Jestliže je nutné, aby vedení se zemním spojením bylo v provozu (s ohledem na nepřerušovaný provoz pro zvláště důležitý odběr), pak je přípustné provozovat vedení až do doby, kdy je vypnutí vedení se zemním spojením možné. Tento stav je možné provozovat pouze do dovoleného oteplení oleje zhášecí tlumivky, které nesmí přesáhnout mezní oteplení.

Doba provozu sítě se zemním spojením závisí na:

- rychlosti vyhledání postiženého úseku se zemním spojením
- spuštění náhradního napájení pro nepostižené části úseků

Tato doba by měla být co nejkratší, aby nedošlo k ohrožení osob v okolí poruchy, ale také i ke vzniku následných poruch.

U kabelových sítí se zpravidla užívá rychlé vypínání zemní ochranou, protože většinou dochází ke zvětšení poruchy a případně i ke zkratu. Proto se musí vadný kabel dostatečně rychle odpojit od napájení pomocí zemních činných relé.[3]

Při vzniku zemního spojení v síti VN se využívá následující postup:

- rozpoznání zemní poruchy v síti VN
- zjištění vývodu se zemním spojením
- lokalizace místa zemního spojení ve zjištěném vývodu

Ochrany, které se v současné době používají v rozvodnách pouze zjišťují vznik zemního spojení a určují vývod se zemním spojením. Přesné místo zemního spojení neurčí. Pro určení místa kde vzniklo zemního spojení se používají tyto způsoby:

- postupné ruční vypínání úseků sítě až do okamžiku ztráty zemního spojení
- automatickým odepínáním úseků sítě až do okamžiku ztráty zemního spojení
- vyhodnocení zemního spojení pomocí indikátoru, které jsou upevněny na sloupech podél vedení

- prohlídka vedení pochůzkou s vizuální kontrolou
- zemní relé, které jsou umístěny na vývodech z rozvodny

2.2 Rozdělení způsobů určení lokalizace místa zemního spojení

2.2.1 Lokalizace místa zemního spojení postupným vypínáním úseků

Při postupném vypínání jednotlivých úseků je snahou docílit co nejmenšího úseku, kde se vyskytuje zemní spojení, které se následovně vypne. Tyto způsoby lokalizace se provádí pomocí dálkově ovládaných a řízených úsečnickových odpojovačů. Využití tohoto je možné v malých rozvodnách, nebo u středně velkých transformoven, kde v důsledku vypnutí nedojde k přerušení dodávky elektrické energie a ke ztrátám ve výrobě. V síti mohou při spínacích procesech vznikat také nebezpečná přepětí, které mohou způsobit tepelné a mechanické namáhání daného vedení a mohou vést ke vzniku opětovného zemního spojení v síti VN. Vyhledávání zemního spojení tímto způsobem je dost zdlouhavý a také ekonomicky nákladný.[1]

2.2.2 Lokalizace zemního spojení užitím indikátorů

Využívají se indikátory, které jsou umístěny na vybraných sloupech podél vysokého vedení.

2.2.3 Lokalizace zemního spojení kontrolou údržby

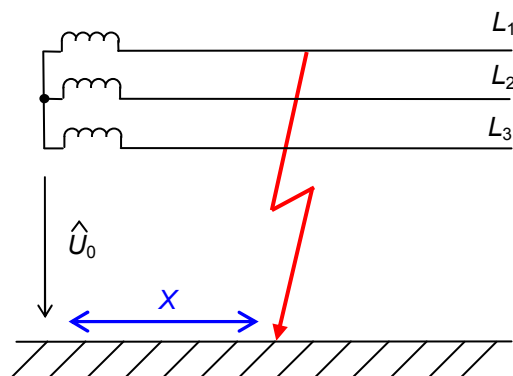
Jedná se o kontrolu údržbářem tzn. vizuální kontrolou porušeného vedení spadlým stromem či přerušení vedení při vzniklém zemním spojení. To však následuje až při bližším určení pozice vzniku zemního spojení.

2.2.4 Lokalizace zemního spojení pomocí zkruhování sítě

K určení místa zemního spojení lze použít i tzv. zkruhování sítě, kdy vedení na kterém je porucha se spojí do „kruhu“ s vedením, které je bez poruchy. Pak pro určení místa vzniku zemního spojení od rozvodny je dáno poměrem admitancí obou vývodů. V některých případech ale nelze zkruhovat zdravý vývod s vývodem se zemním spojením.

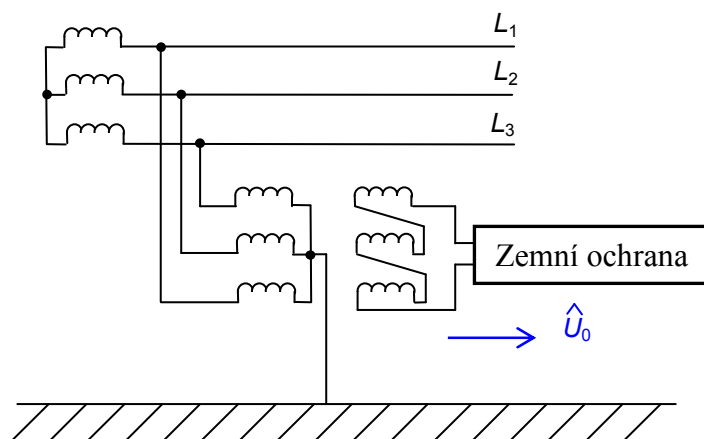
2.2.5 Lokalizace místa zemního spojení s využitím napěťového kritéria

Pro rozpoznání zemního spojení postačí napěťová ochrana, která měří napětí uzlu proti zemi. Při normálním provozu je napětí mezi uzlem a zemí téměř nulové, ale jakmile vznikne zemní spojení objeví se napětí U_0 mezi uzlem a zemí. Toto napětí je úměrné vzdálenosti x zemního spojení od uzlu transformátoru.



Obr. 2-1 Napětí na uzlu transformátoru při zemním spojení

Ochrana, která je umístěna v uzlu transformátoru využívá pro měření přístrojový transformátor napětí, kde měří napětí U_0 mezi uzlem transformátoru a zemí. Pro další měření se využívá zapojení tří přístrojových transformátorů napětí v zapojení do otevřeného trojúhelníku (Obr. 2-2). Toto zapojení se používá jestliže není k dispozici přístrojový transformátor napětí v uzlu. Uzel vstupní hvězdy těchto transformátorů musí být uzemněn.



Obr. 2-2 Připojení ochrany na otevřený trojúhelník

Tento způsob využití napěťové ochrany postačí tam, kde je nutné vypnout celou postiženou síť a není možné ji odpojením postižené části udržet dále v chodu. Jde například o alternátor, který pracuje v bloku s transformátorem, kde strana VN tvoří nedílný celek. Měřicí transformátory jsou konstruovány tak, že potlačují vyšší harmonické vzniklé zemním spojením. Je to kvůli tomu, že napětí U_0 obsahuje řadu vyšších harmonických, které můžou při citlivém nastavení ochrany neblahodárně ovlivnit funkci této ochrany.[14]

2.2.6 Lokalizace místa zemního spojení s využitím proudového kritéria

Jestliže je využito toto kritérium k určení místa zemního spojení, je zapotřebí nejprve vypočítat zemní kapacitní proudy chráněného vývodu I_{CV} a okolní připojené sítě I_{CS} .

$$I_{CS} = 3\omega C_{0S}U_f \quad (\text{r. 2-1})$$

$$I_{CV} = 3\omega C_{0V}U_f \quad (\text{r. 2-2})$$

Pro určení místa zemního spojení rozlišujeme dva případy:

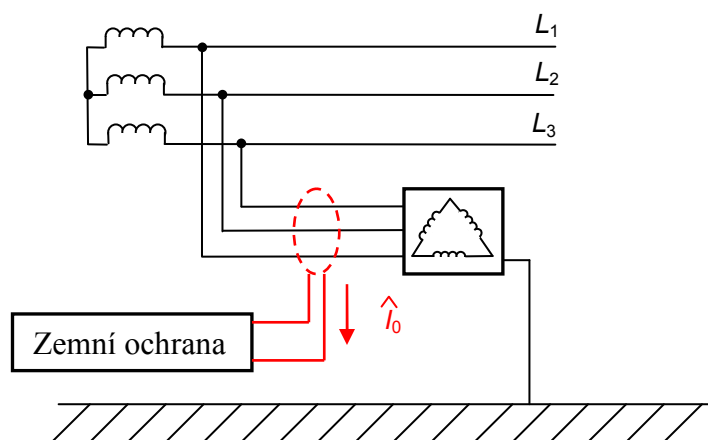
je-li $I_{CS} \gg I_{CV}$

je-li $I_{CS} \approx I_{CV}$

$I_{CS} \gg I_{CV}$

To znamená, že kapacitní proud sítě je mnohonásobně vyšší než kapacitní proud chráněného vývodu. Je-li tato podmínka splněna je vhodné použít ochranu podle obrázku (Obr. 2-3). Při zemním spojení prochází v místě ochrany a chráněném vývodu nulová složka kapacitního proudu

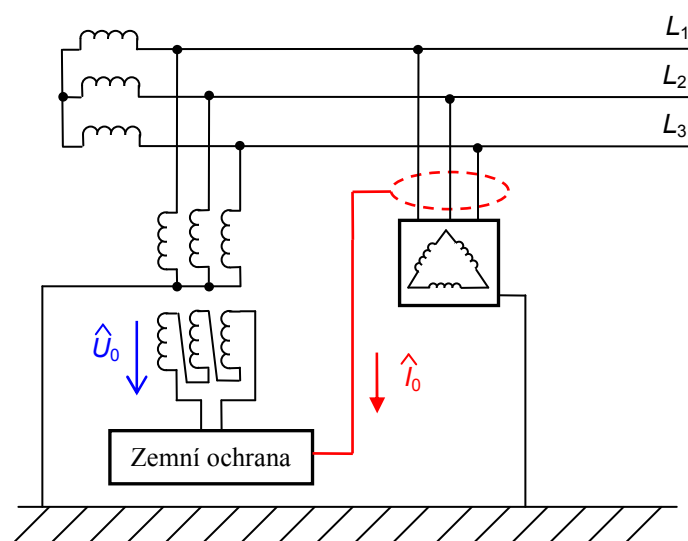
sítě I_{CS} a taktéž z vedení nulová složka kapacitního proudu vývodu I_{CV} . Proudová ochrana $I_0 >$ je naladěna mezi tyto dva proudy, tj. $I_{CV} < I_C < I_{CS}$. Nulovou složku zemního kapacitního proudu I_0 pro napojení zemní nadproudové ochrany získáme z průvlekového transformátoru proudu.



Obr. 2-3 Zemní ochrana sítě s izolovaným bodem se zemním proudem $I_{CS} \gg I_{CV}$

$I_{CS} \approx I_{CV}$

To znamená, že kapacitní proud sítě je srovnatelný s proudem chráněného vývodu. Pokud výpočet zemních proudů ukáže, že pouhá velikost zemního kapacitního proudu I_{KAP} není postačujícím kritériem pro určení místa zemního spojení, použijeme zapojení ochrany dle (Obr. 2-4). Ochrana je založena na tom, že při zemním spojení se mění směr proudu, je-li zemní spojení na vývodu nebo v síti. Ochrana je založena na tom, že při zemním spojení na vývodu je síť napájena kapacitním proudem z vývodu a naopak. Proto tuto ochranu nazýváme jalovou. Ochrana zjišťuje směr toku energie v poškozeném obvodu a působí jen při zemním spojení uvnitř vývodu. Nulová složka proudu je měřena průvlekovým přístrojovým transformátorem proudu, nebo skupinou tří přístrojových transformátorů proudu.[1]



Obr. 2-4 Zemní ochrana sítě s izolovaným bodem se zemním proudem $I_{CS} \approx I_{CV}$

2.2.7 Lokalizace vývodu se zemním spojením

Vývod se zemním spojením se odlišuje od ostatních zdravých vývodů poruchovým proudem, který má velikost:

$$\hat{I}_p = j\omega 3C_0 U_f \quad (\text{r. 2-3})$$

Vzhledem k velikosti těchto proudů ve srovnání s proudy zátěže je ve většině případů nelze jednoduše zjišťovat přímo měřením v jednotlivých fázích, jako je tomu např. v sítích 110 kV, kde proudy zemních poruch mnohonásobně překračují provozní proudy. Ke zjišťování vývodu se proto používají takové veličiny, ve kterých se fázové proudy neuplatňují. Pro zjištění složky proudu se většinou používají tzv. součtové zapojení transformátorů, v jejichž uzlu se uzavírá proud:[14][10]

$$\sum \hat{I} = \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_3 \quad (\text{r. 2-4})$$

2.2.8 Lokalizace u sítě s izolovaným uzlem

U sítě s izolovaným uzlem platí, že součtový proud vývodu se zemním spojením má velikost danou rozdílem kapacitního proudu celé sítě a proudu vlastního vývodu. Aby bylo možné pro zjištění vývodu se zemním spojením využít proudové kritérium, musí platit pro každý vývod, že proud zemní ochrany se dostatečně liší při poruše na vlastním vývodu a mimo vývod. Tato podmínka musí být splněna nejen při ideálním zemním spojení, ale i při odporovém zemním spojení. V krajním případě, kdy uzlem prochází 33% U_f se vývodem s poruchou uzavírá 33% kapacitního proudu sítě, které by však s dostatečnou bezpečností měli překročit nastavení zemní nadproudové ochrany, vyjádřené podmínkou:

$$I_{\text{nas}} \leq \frac{0,33 \cdot I_{\text{kap}}}{k_c \cdot p_i} \quad (\text{r. 2-5})$$

Současně s touto podmínkou musí být zajištěno, aby ochrana nesprávně zareagovala při zemním spojení na jiném vedení, kdy zdravým vývodem protéká jeho vlastní kapacitní proud sítě. Z toho vyplývá podmínka použitelnosti nadproudového kritéria pro vývod.

$$I_c \geq 3k_b k_c I_c \quad (\text{r. 2-6})$$

Protože tyto předpoklady obvykle nejsou splněny, používají se v sítích s izolovaným uzlem směrové ochrany, které měří směr jalového proudu daného napětím na uzlu U_0 a součtovým proudem vývodu.

$$Q = U_0 \sum I \cdot \sin \varphi \quad (\text{r. 2-7})$$

Protože v tomto případě se směr a tím i výkon u zdravého vývodu a vývodu se zemním spojením

dostatečně liší.[3]

2.2.9 Lokalizace u sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů

U těchto sítí bývá velikost i směr jalové složky proudu u vývodu se zemním spojením závislá na vyladění sítě tj. na nastavení zhášecí tlumivky. Proto se u těchto sítí používá jako kritérium zemní poruchy obvykle činný výkon a u elektrických ochran směr součtového proudu.

Vlivem nesymetrií v sítích eventuálně nesymetrií ve vlastních proudových transformátorech či jejich zátěžích se uzlem proudových transformátorů uzavírá určitý rušivý proud. U kompenzovaných sítí se používá zvyšování proudu při zemním spojení, které umožňuje, aby zemní ochrany byly nastaveny nad tento rušivý proud. Podmínkou pro dostatečný výkon ke spolehlivému rozběhu vyjadřuje vztah:

$$P_{\text{nast}} \leq \frac{\left(\sum P - P_{\text{ruš}}\right)}{k_c} \quad (\text{r. 2-8})$$

Současně je třeba zajistit, aby nastavení relé bylo dostatečné nad rušivým výkonem. S ohledem na orientační určení rušivých výkonů je tento dán podmínkou $P_{\text{nast}} \geq 2 P_{\text{ruš}}$. Kromě odstupu rušivých proudů je zapotřebí pro správnou činnost směrových ochran také správné orientované připojení proudových a napět'ových obvodů.[10]

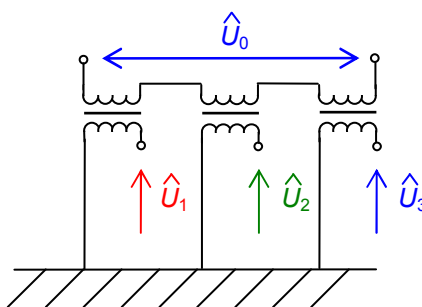
2.3 Popis zemních ochran

Ochrany, které se používají k zjištění zemního spojení se nazývají zemní ochrany. Pro indikaci poruchových zemních proudů se musí brát na vědomí, v jak provozované síti bude ochrana pracovat. V kompenzovaných sítích slouží pro zajištění zemního spojení wattová relé, kdežto k chránění nekompenzovaných sítí nebo kabelových vedení před následky trvalého zemního spojení se používají jalová relé.

U kompenzovaných sítí se používá zhášecí tlumivka, která zamezuje dalšímu vzniku opětovného zapálení oblouku.[3]

2.3.1 Zemní napět'ová ochrana

Ochrana měří napětí U_0 z měřících transformátorů napětí přípojníc. Po překročení nastavené hodnoty napětí U_0 okamžitě hlásí vznik zemního spojení na rozvodně. U_0 je měřeno z otevřeného trojúhelníku vinutí měřícího transformátoru napětí, jehož převod je 22/0,1 kV.



Obr. 2-5 Měření U_0 z otevřeného trojúhelníku MTN

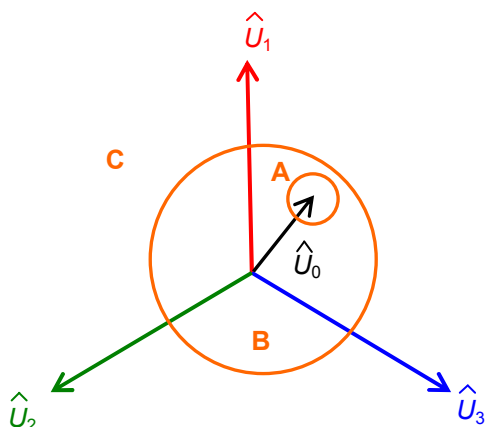
2.3.3.3 Princip RG_0I_0

Zemní ochrana RG_0I_0 slouží pro zabezpečení sítí VN před zemním spojením. Je určena pro libovolný provoz uzlu systémového transformátoru. Jde o zařízení, které vyhodnocuje činnou složku admitance na příslušném vývodu prostřednictvím měření U_0 a I_0 . Měření je selektivní pro systémovou frekvenci 50 Hz. Podmínka působení ochrany je překročení nastavené časové prodlevy rozběhové hodnoty proudu činné složky I_0 . [15]

2.3.3.4 Systém Swedish Neutral

Swedish Neutral je název systému, který zajišťuje ochranu VN distribučního rozvodu při zemním spojení. Integrované funkce systému jsou:

- dálkové ovládání, vyčítání dat a komplexní práce se systémem,
- kompenzace zemního poruchového proudu,
- identifikace vzniku zemního spojení,
- identifikace vývodu se zemním spojením a nalezení místa poruchy.



Obr. 2-8 Toleranční pole monitorování sítě systémem Swedish Neutral

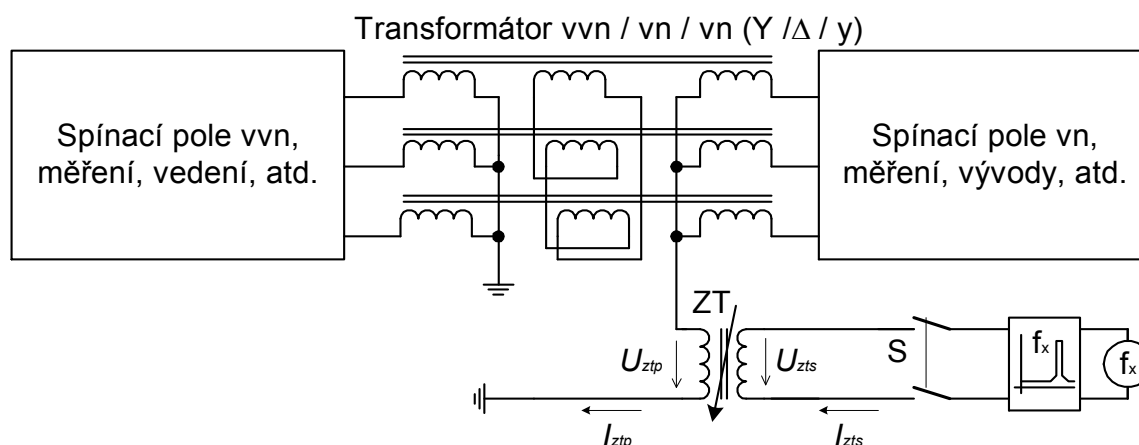
Základem identifikace zemního spojení je vyhodnocování nulového napětí a jeho komparace s nastavenými limitními hodnotami viz. (Obr. 2-8). Při normálním provozu bude vektor napětí na zhašecí tlumivce kolísat na ploše ohraničené kružnicí A, během manipulací v síti se toleranční pole může zvětšit na ohraničení kružnicí B. Při překročení nastaveného limitu do oblasti C se indikuje zemní spojení. [15]

2.3.3.5 Systém dodatečně injektovaného diagnostického signálu

Pod pojmem dodatečně do systému injektovaný diagnostický signál je zde myšlen takový signál, který svými vlastnostmi umožní provést diagnostický proces za plného provozu systému během vzniklého zemního spojení. Z důvodu jeho nezaměnitelnosti s jinými systémovými signály musí být vhodně zvolen ze dvou hledisek - analýzy parametřů diagnostického signálu a možného zpětného ovlivnění zařízení systému.

Volba druhu a tvaru diagnostického signálu je vázána na místo jeho injektáže. Jako optimální bod injektáže jeví elektrický střed systémových zdrojů. V případě sítě distribučního rozvodu vysokého napětí bude tento střed tvořen uzlem, který spojuje sekundární vinutí napájecího transformátoru sítě vysokého napětí. Použitím středu elektrického systému se zjednoduší zapojení diagnostického

zařízení. Jeden zdroj testovacího impulsu je tak použitelný pro všechny tři fáze VN systému distribučního rozvodu.[3]



Obr. 2-9 Princip zapojení diagnostického zdroje do obvodu sítě prostřednictvím výkonového vinutí kompenzační zhášecí tlumivky [3]

2.4 Zemní ochrany

2.4.1 Modul kombinované nadproudové a zemní ochrany SPCJ 4D29

Popis funkce

Fázová nadproudová jednotka

Fázová nadproudová jednotka modul ochrany SPCJ 4D29 je určena pro jednofázové, dvoufázové a třífázové nadproudové chránění. Jednotka obsahuje dva nadproudové stupně – nadproudový stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti $I>$ a nadproudový stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti $I>>$. Fázový nadproudový stupeň s nižším / vyšším rozsahem je aktivován v okamžiku, kdy proud v jedné nebo v několika fázích překročí nastavenou popudovou hodnotu proudu příslušného stupně. Pokud stav charakterizovaný nadproudem trvá dostatečně dlouhou dobu, aby byl překročen nastavený čas působení, stupeň působí a je generován vypínací signál. Při navolené nezávislé časové charakteristice je vypínací čas $t>$ nastaven v sekundách v rozsahu 0,05...300 s. Při výpočtu nastavení ochrany musí být brána do úvahy maximální trvalá přetížitelnost proudových měřicích vstupů $4 \times I_N$. Rozsah seřiditelnosti popudového proudu fázového nadproudového stupně je 0,5...40 $\times I_N$.

Jednotka zemní ochrany

Zemní nesměrová jednotka modulu ochrany SPCJ 4D29 je jednopólová zemní ochrana. Jednotka obsahuje dvoustupňovou zemní ochranu tj. stupeň zemní ochrany s nižším rozsahem seřiditelnosti $I_0>$ a stupeň zemní ochrany s vyšším rozsahem seřiditelnosti $I_0>>$. Stupeň zemní ochrany s nižším / vyšším rozsahem je aktivován v okamžiku, kdy měřený proud překročí nastavenou popudovou hodnotu proudu příslušného stupně. Při popudu je stupněm generován popudový signál a současně je popud signalizován na číslicovém displeji na čelním panelu. Pokud stav charakterizovaný zemním proudem trvá dostatečně dlouhou dobu, aby byl překročen nastavený čas působení, stupeň

působí a je generován vypínací signál.[5]

2.4.2 Směrová ochrana proti zemnímu spojení RE 54

Provoz směrové ochrany proti zemnímu spojení je založen na zemním / nulovém proudu I_0 a zbytkovém napětí U_0 .

Popis funkce

Proud zemního spojení I_0 může být změřen konvenčním proudovým transformátorem. Pokud je nula systému buď izolovaná nebo vysokoimpedančně uzemněná, je pro ochranu proti zemnímu spojení doporučen průvlekový transformátor. Kvůli zajištění dostatečné přesnosti měření zemních složek proudu by neměly mít průvlekové transformátory převod alespoň 70:1. Nižší převody se nedoporučují.

Při směrovém provozu je prováděn výpočet úhlu φ , tj. fázového úhlu mezi zbytkovým napětím a proudem zemního spojení, který začne, když proud zemního spojení překročí hodnotu $0,5\% I_N$ a zbytkového napětí hodnotu $0,5\% U_N$.

Základní úhel směrového provozu závisí na principu uzemnění sítě tak, že v izolované síti je $\varphi_b = -90^\circ$ a v síti kompenzované je $\varphi_b = 0^\circ$. Základní úhel φ_b může být nastaven na hodnoty -90° , -60° , -30° nebo 0° .

Provozní kritéria

Základní úhel & U_0

Směrová funkce je založena na základním úhlu a zbytkovém napětí, nabíhá při splnění následujících podmínek:

- proud zemního spojení I_0 překročil nastavenou hodnotu mezního proudu
- zbytkové napětí U_0 překročí nastavenou hodnotu napětí
- fázový úhel φ mezi zbytkovým napětím a proudem zemního spojení je v provozním rozsahu

Základní úhel

Směrová funkce je založena na základním úhlu a nabíhá při splnění následujících podmínek:

- proud zemního spojení I_0 překročí nastavenou mezní hodnotu proudu
- fázový úhel φ mezi zbytkovým napětím a proudem zemního spojení je v provozním rozsahu

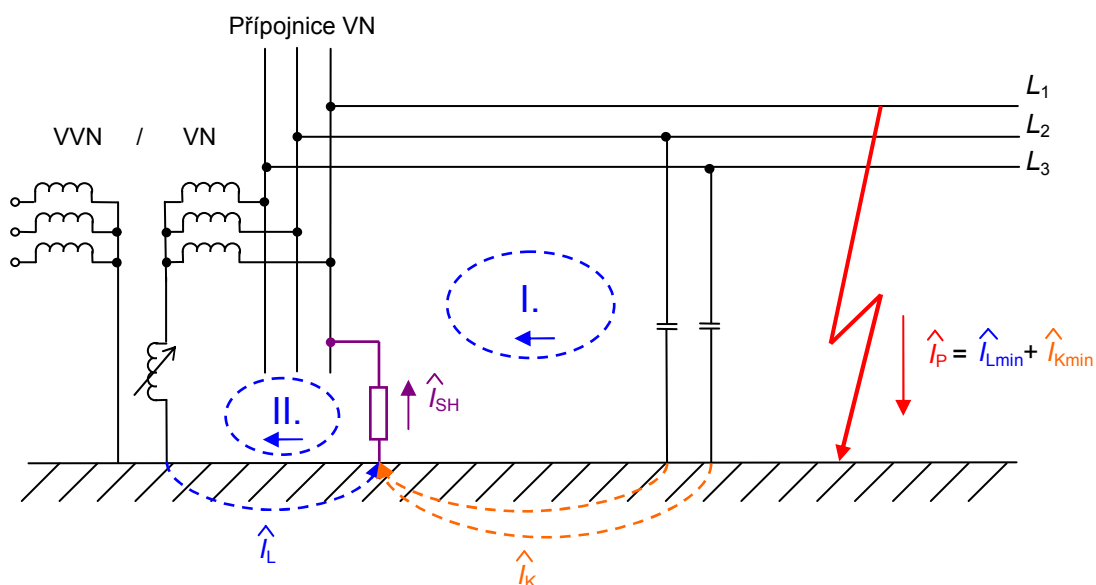
Nesměrový I_0 / U_0

Nesměrová funkce, založena na proudu / zbytkovém napětí nabíhá, když proud / napětí překročí nastavenou mezní hodnotu proudu / napětí.[12]

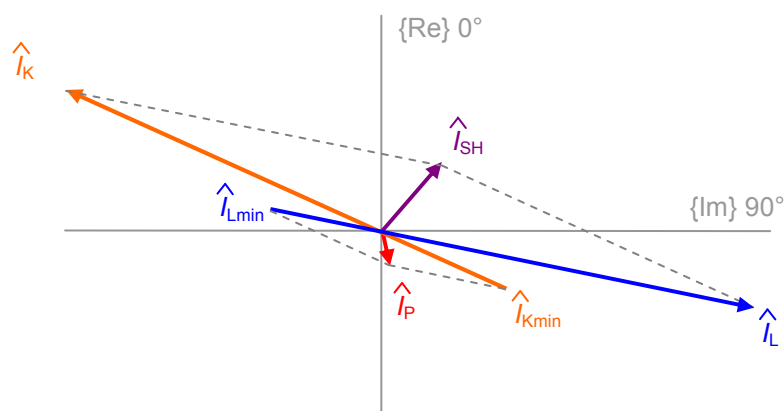
3 „Šentování“ jako diagnostická metoda

Paralelní zemní spojení, zvané jako šentování (z angl. shunting – odbočka), má za úkol minimalizovat poruchový proud zemním spojením. Princip šentování spočívá v tom, že se proud v paralelních větvích rozděluje v opačném směru jejich impedancí. Pokud se po vzniku zemního spojení stejná fáze na napájecí přípojnici uzemní, zemní spojení zmizí. V distribučních soustavách je šentování používáno v odporově uzemněných sítích, kde se po vzniku jednofázové poruchy postižená fáze na okamžik uzemní. V sítích nepřímě uzemněných přes indukčnost je vhodnější trvalé uzemnění postižené fáze do doby odstranění poruchy.

Čím je impedance smyčky I. větší než impedance smyčky II., tím je „šentování“ účinnější. Poruchový proud teče kratší smyčkou II. uzemňovací soustavou rozvodny, která je dimenzovaná na zkratové proudy.[1]



Obr. 3-1 Princip „šentování“

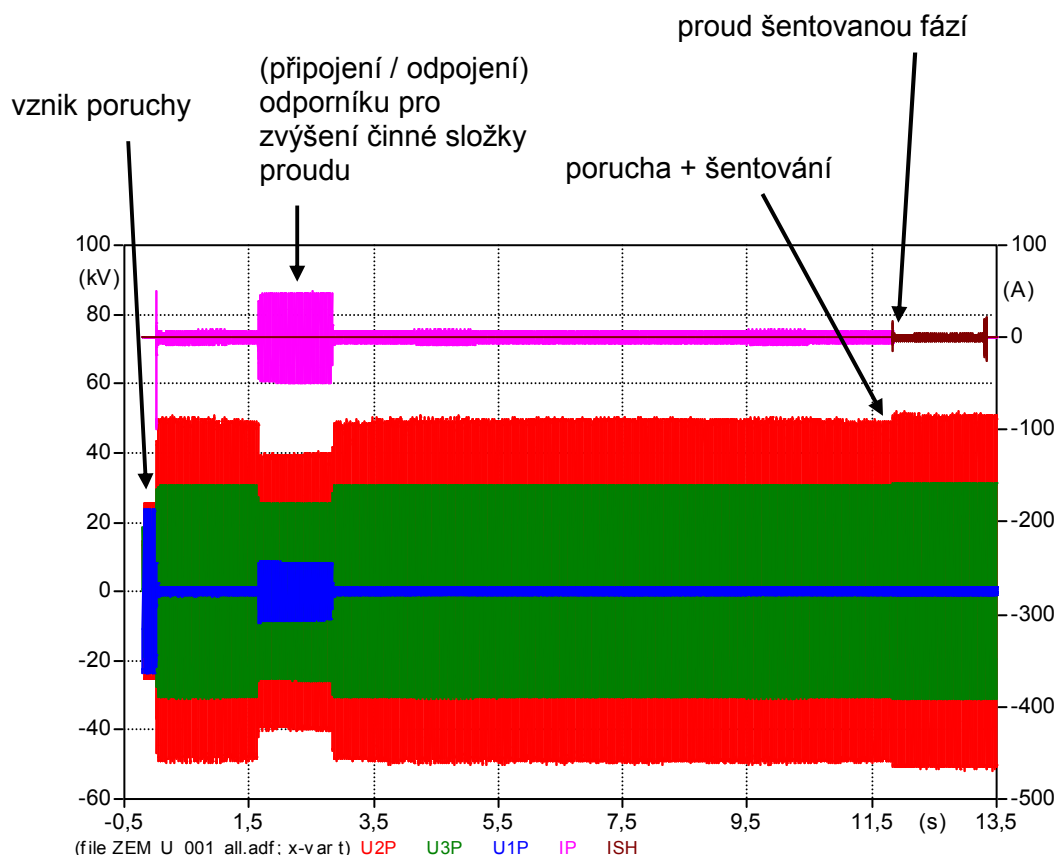


Obr. 3-2 Fázorový diagram proudových poměrů - šentování

3.1 Proces šentování

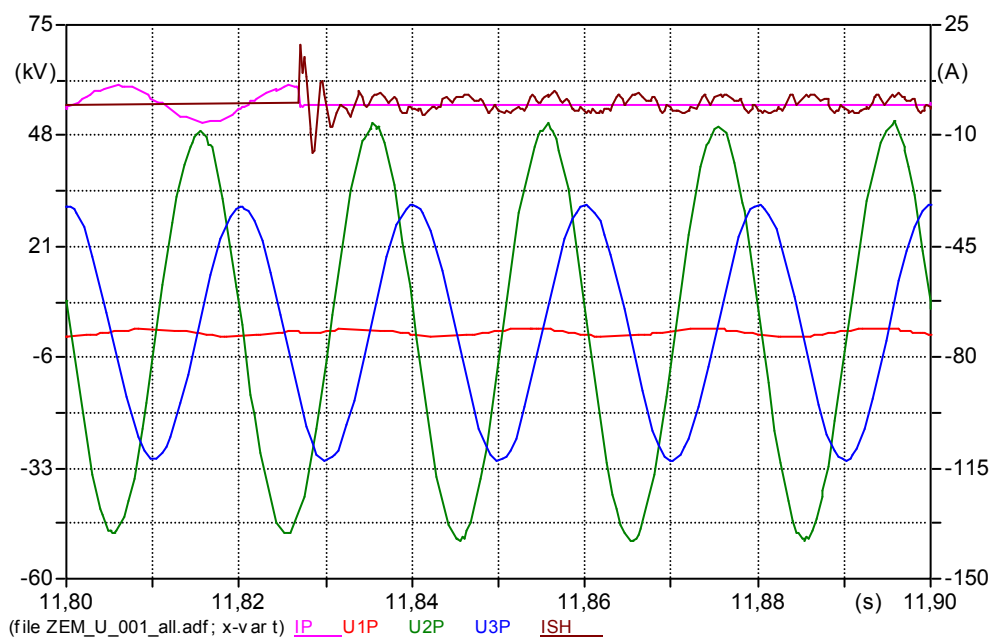
- Vznik jednopólové poruchy.
- Napěťová ochrana na přípojnici určí, ve které fázi je porucha.
- Za 1s se připojí na 1s stavebnicový odporník do sekundárního vinutí tlumivky.
- Zemní směrové ochrany, dálkové odpínače a jiné indikátory v síti vyhodnotí poruchu a nahlásí na dispečink přibližnou oblast výskytu poruchy.
- Za 3s po vzniku poruchy se uzemňuje postižená fáze přímo na přípojnici VN jednopólovým vypínačem.
- Poruchový proud, tekoucí smyčkou I. (Obr. 3-1), je přesměrován do zemnicí soustavy rozvodny smyčky II. Smyčka II. má vzhledem ke smyčce I. malou impedanci, takže se poruchový proud rozdělí v opačném poměru těchto impedancí. Místem poruchy tak teče minimální poruchový proud.
- Za nastavený čas se „šentovací“ vypínač vypne. Pokud zemní porucha nadále trvá, tak se opět sepne.
- Dispečink posílá poruchovou službu na vymezené místo poruchy, které je „šentováno“ na rozvodně. Porucha je provozována do doby oteplení tlumivky a bez přechodných jevů.
- Dispečink po nalezení místa poruchy vypíná „šentování“.[1]

3.2 Praktická měření šentování



Obr. 3-3 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu šentovanou fází I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$, vyladěná tlumivka)

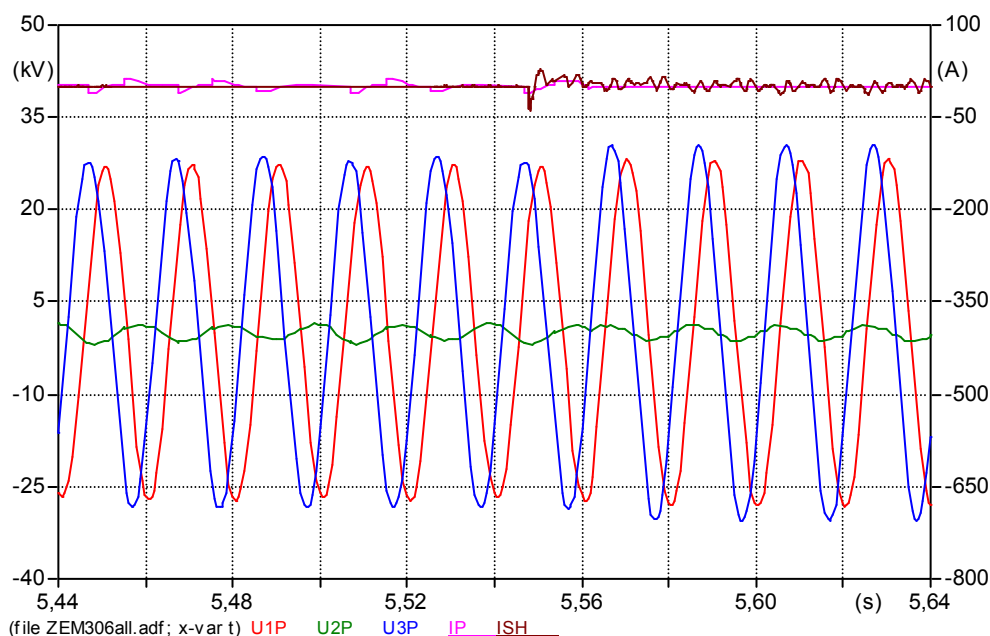
(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 3-4 Detail - Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu šentovanou fází I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 0 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)

Na (Obr. 3-4) jsou znázorněna fázová napětí a proudy při vzdáleném kovovém zemním spojení. Je vidět, že poruchový proud zemním spojením po připojení „šentování“ zmizel.



Obr. 3-5 Detail - Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu šentovanou fází I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (jiskřiště, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)

VN)

Z (Obr. 3-5) je vidět, že po připojení „šentování“ klesl poruchový proud zemního spojení z 5,3A na 0,1A. Oblouk uhasnul. Zmizely přechodové jevy, doprovázející obloukové zemní spojení. Izolace jsou dimenzovány na sdružené napětí, to je provozovatelný stav.

3.3 Přínos šentování

V distribučních sítích nepřímo uzemněných přes indukčnost je možno vyhledat místo zemního spojení za provozu bez vypínání postiženého vedení nebo jeho části. Jediný limitující faktor je oteplení zhášecí tlumivky, která bude namáhána kovovým zemním spojením. V dnešní době, kdy je doba nedodávky elektrické energie jedním z nejsledovanějších parametrů kvality, má „šentování“ značný přínos. Nedodávka elektrické energie je minimalizována jen na dobu opravy poruchy.[1]

4 Vyhodnocení experimentálních měření

Úkolem měření bylo simulovat různé typy středně vzdáleného zemního spojení (nízko-odporové, odporové 400Ω , vysoko odporové 1600Ω , obloukové) napájeného z rozvodny MŽR9.

Zemní spojení bylo vzdáleno přibližně 10km od rozvodny. Pro zemní spojení byly postupně vybrány fáze L_2 , L_3 a L_1 . Tato fáze byla postupně přizemňována přes kabelovou spojku, na které se měřil poruchový proud. K této kabelové spojce se připojovaly jednotlivé prvky měnicí charakter zemního spojení (odporník 400Ω , 1600Ω , jiskřiště, poškozený kabel, konzola stožáru vedení).[13]



4.1 Popis místa zemního spojení

Místo měření bylo poblíž spínací stanice v Novém Městě na Moravě.



4.2 Popis měřicí techniky

Osciloskop Yokogawa DL708:

U_{1P}	CH1 (x1000), sonda L3 (V)
U_{2P}	CH2 (x1000), sonda L2 (V)
U_{3P}	CH3 (x1000), sonda L1 (V)

I_p (rázová) CH5 (x1000) (A)
 I_p (ustálená) CH6 (x100) (A)

Indikátory zemního spojení:

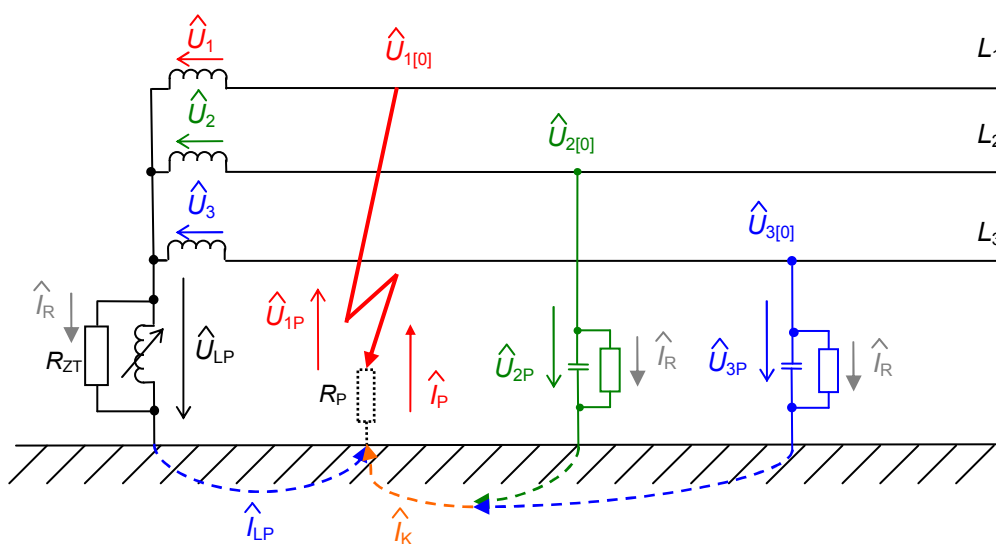
Byly instalovány dva indikátory MEg61 a dva indikátory MEg60, vždy jeden před místo zemního spojení a druhý za místo zemního spojení (ze směru od napáječe). Instalace byla provedena na vedení s rovinným uspořádáním

Osciloskop DL750:

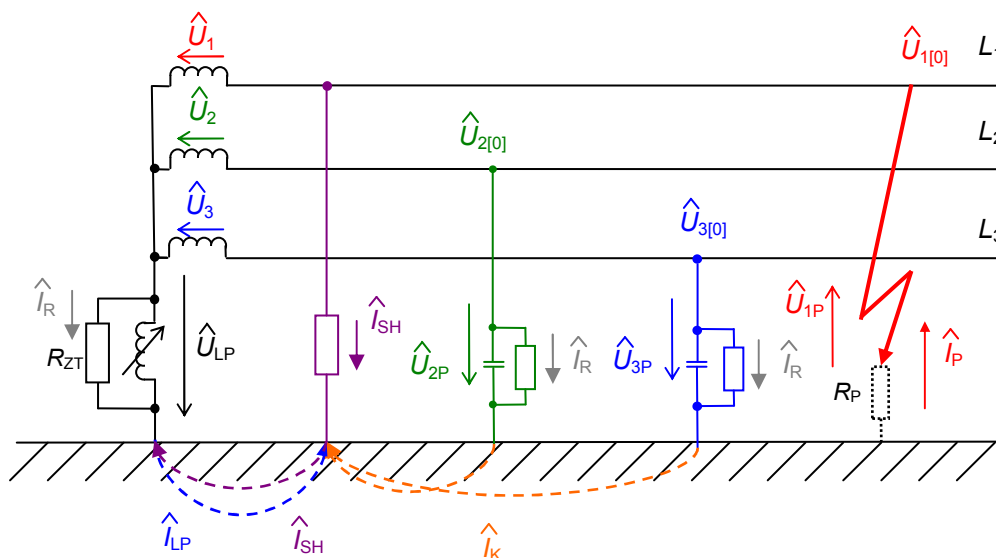
CH1 - I_1 proud vývodem fáze 1 (K3N),
 CH2 - I_2 proud vývodem fáze 2 (K3N),
 CH3 - I_3 proud vývodem fáze 3 (K3N),
 CH4 - I_{SH} proud šentovanou fází (K3N),
 CH5 - U_1 napětí fáze s poruchou,
 CH6 - U_2 napětí fáze bez poruchy.

Analýzátor v rozvodně:

proud tlumivkou I_L , napětí na tlumivce U_L . [13]

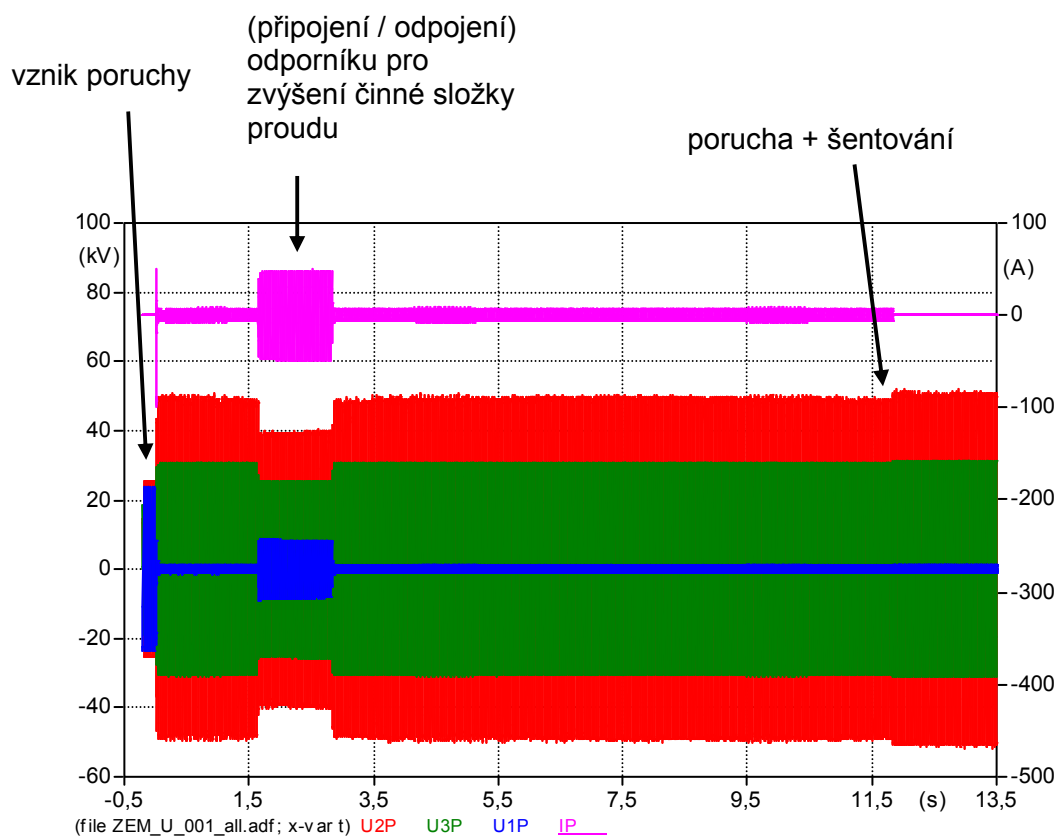


Obr. 4-1 Obecné schéma měření



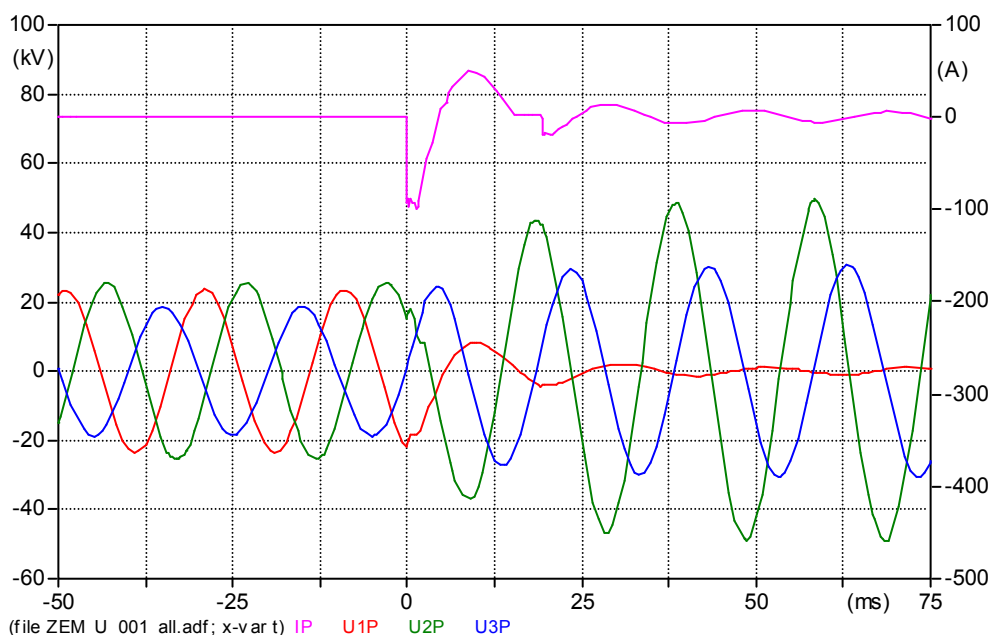
Obr. 4-2 Schéma měření s šentovanou fází

4.3 Kovové zemní spojení - vyladěná tlumivka



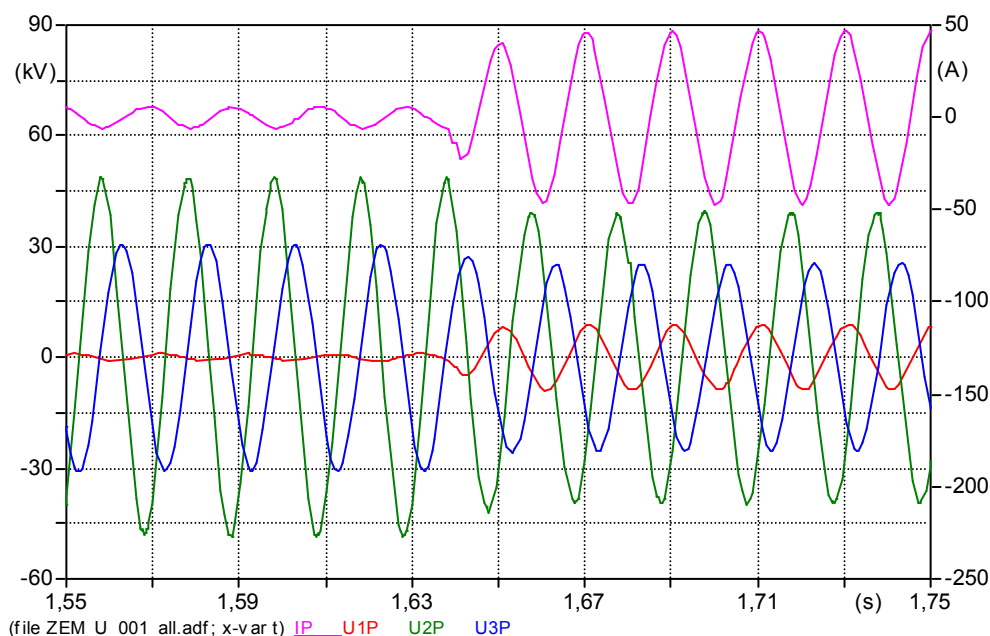
Obr. 4-3 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v síti s nepřímou uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 0 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



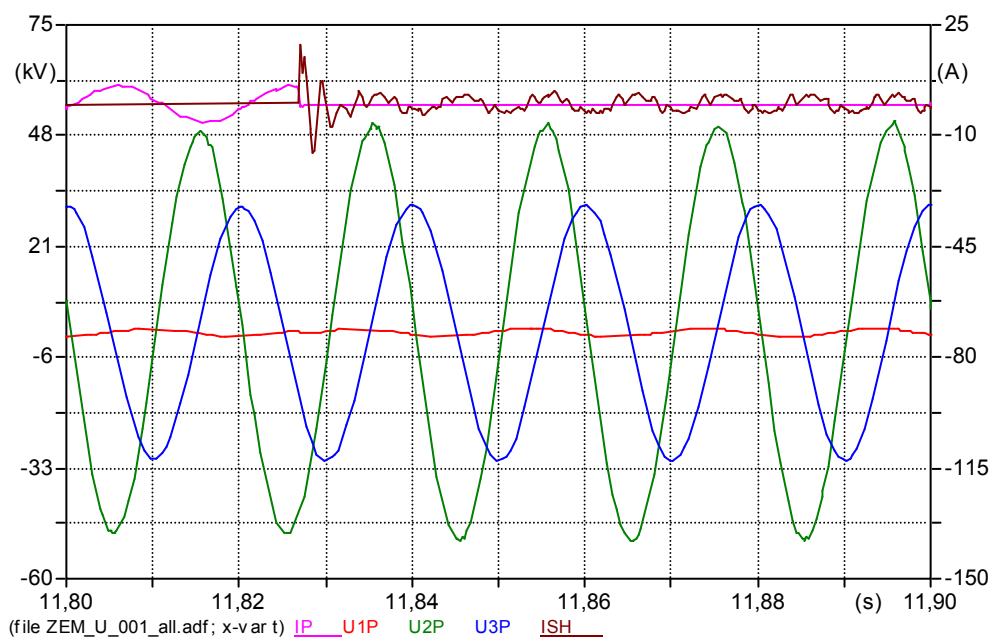
Obr. 4-4 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v okamžiku zemního spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-5 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v okamžiku zemního spojení po připojení odporu pro zvýšení činné složky proudu v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-6 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu šentovanou fází I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 0 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napětových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)

$$\hat{U}_{1[0]} = 23464 \cdot e^{-199,1}$$

$$\hat{U}_{2[0]} = 25472 \cdot e^{-305,7}$$

$$\hat{U}_{3[0]} = 18713 \cdot e^{-90,7}$$

$$\hat{U}_{1P} = 993 \cdot e^{-221,6}$$

$$\hat{U}_{2P} = 48343 \cdot e^{-330,1}$$

$$\hat{U}_{3P} = 30617 \cdot e^{-56,1}$$

$$\hat{U}_{LP} = 17579 \cdot e^{-184,8}$$

$$\hat{I}_{LP} = 186,5 \cdot e^{-274,4}$$

$$\hat{I}_P = 5,7 \cdot e^{-161,7}$$

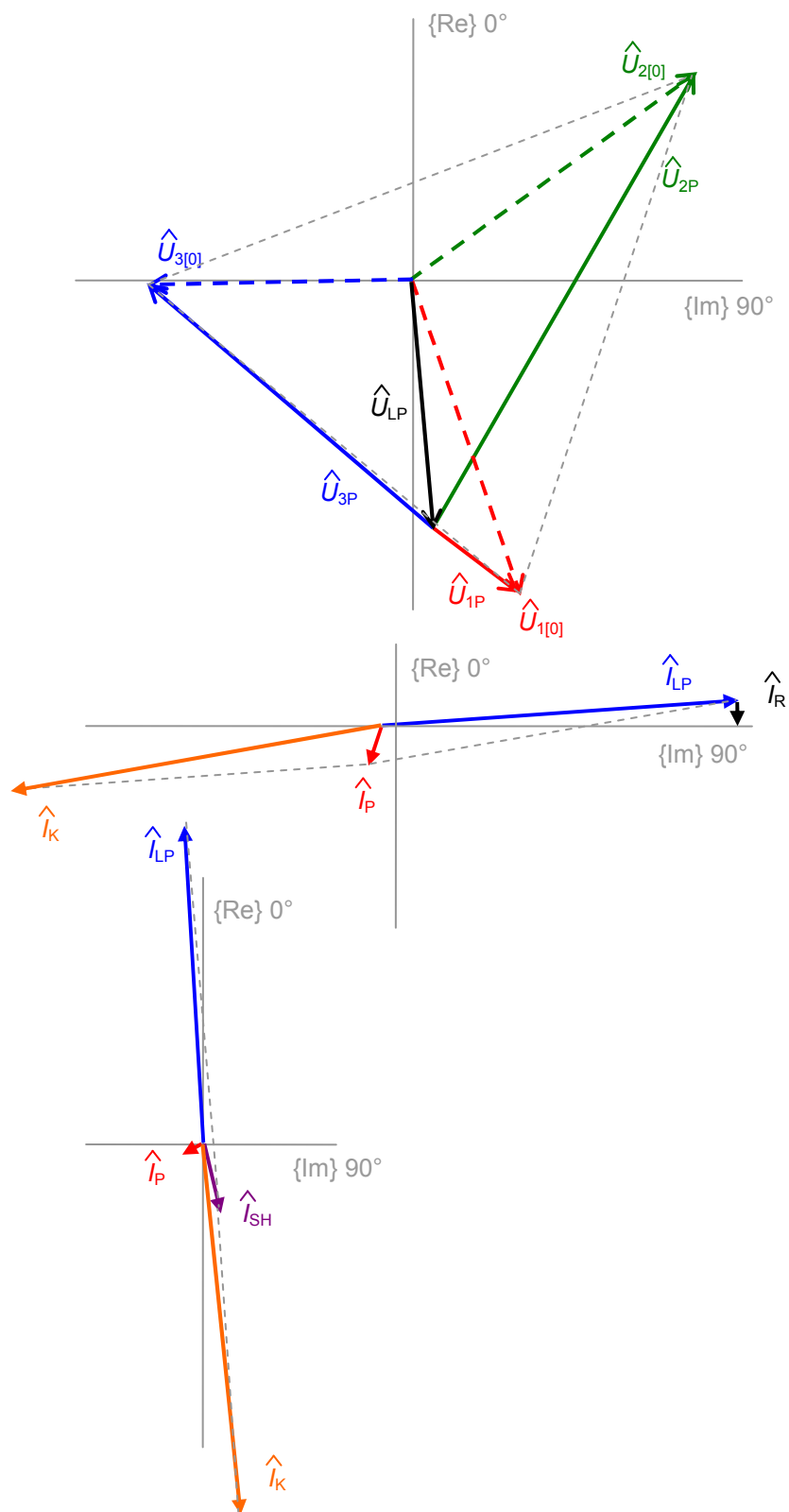
$$\hat{I}_{SH} = 2,6 \cdot e^{165}$$

$$\hat{I}_P = 0,1 \cdot e^{-118,8}$$

$$\hat{I}_{LP} = 196 \cdot e^{-3,8}$$

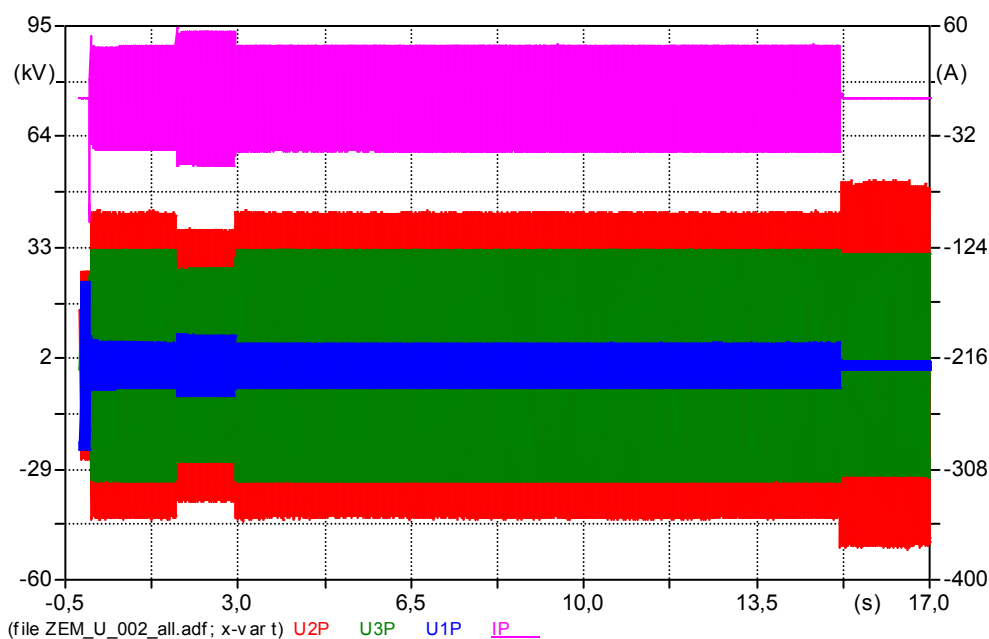
$$\hat{U}_{1[0]} - \text{bez poruchy}$$

$$\hat{U}_{1P} - \text{porucha}$$



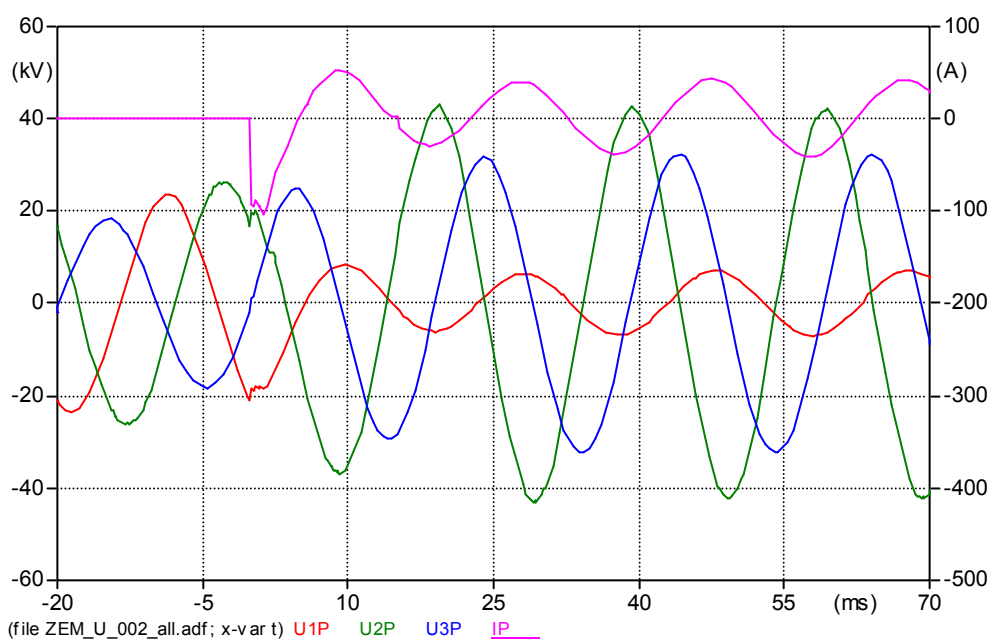
Obr. 4-7 Fázorové diagramy napětových a proudových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 0 \Omega$, vyladěná tlumivka)

4.4 Kovové zemní spojení - rozladěná tlumivka



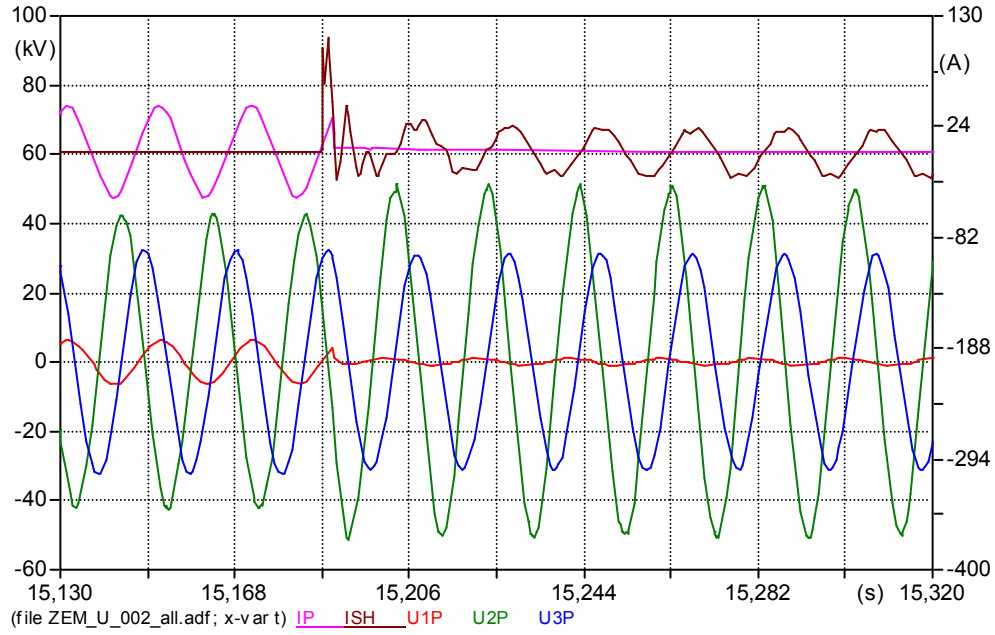
Obr. 4-8 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$, rozladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-9 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v okamžiku zemního spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$, rozladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-10 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu šentovanou fází I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 0 \Omega$, rozladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)

$$\hat{U}_{1[0]} = 23530 \cdot e^{0,9}$$

$$\hat{U}_{2[0]} = 26182 \cdot e^{-102,4}$$

$$\hat{U}_{3[0]} = 18163 \cdot e^{111,9}$$

$$\hat{U}_{1P} = 6514 \cdot e^{23}$$

$$\hat{U}_{2P} = 41983 \cdot e^{-179,8}$$

$$\hat{U}_{3P} = 32292 \cdot e^{92,3}$$

$$\hat{U}_{LP} = 16901 \cdot e^{-31,8}$$

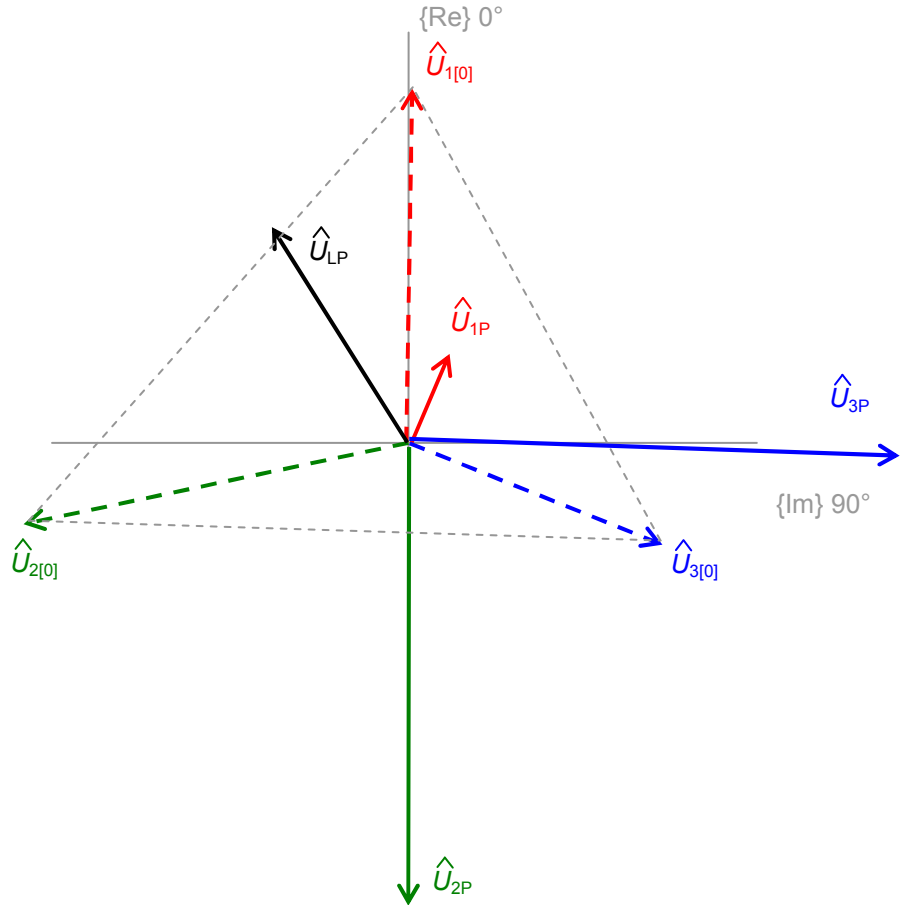
$$\hat{I}_{LP} = 135,1 \cdot e^{-121,7}$$

$$\hat{I}_P = 42,2 \cdot e^{31,6}$$

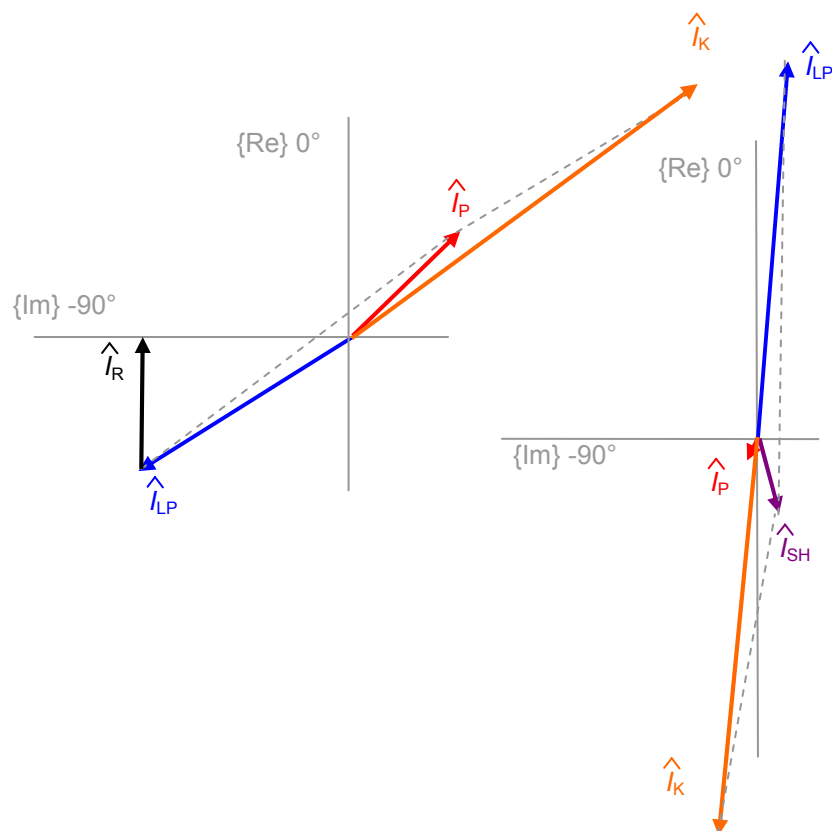
$$\hat{I}_{SH} = 23,8 \cdot e^{-185,1}$$

$$\hat{I}_P = 0,1 \cdot e^{-150,9}$$

$$\hat{I}_{LP} = 145,2 \cdot e^{-356,2}$$

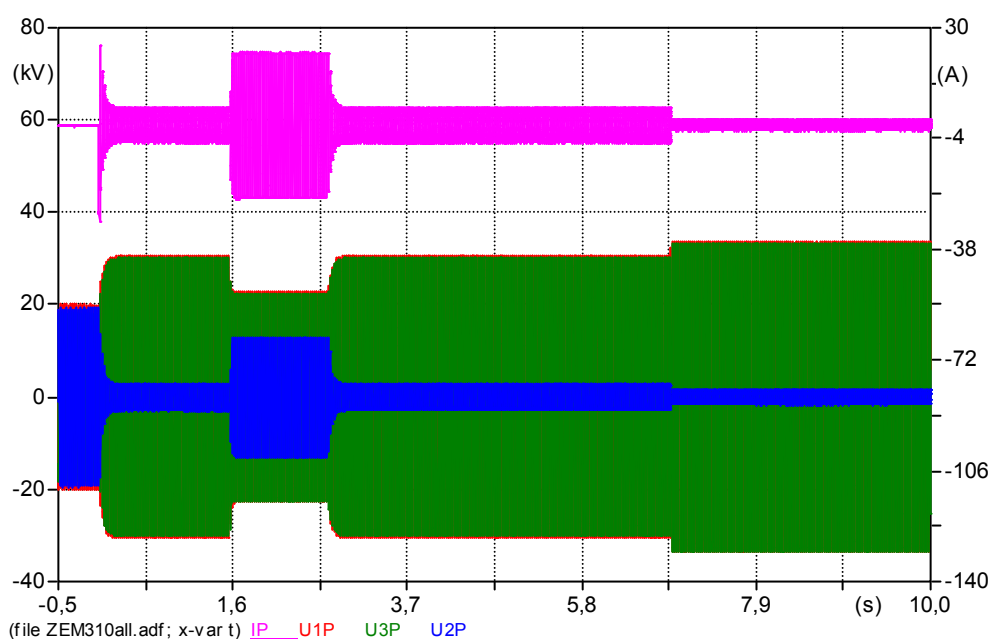


Obr. 4-11 Fázorový diagram napěťových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$, rozladěná tlumivka)



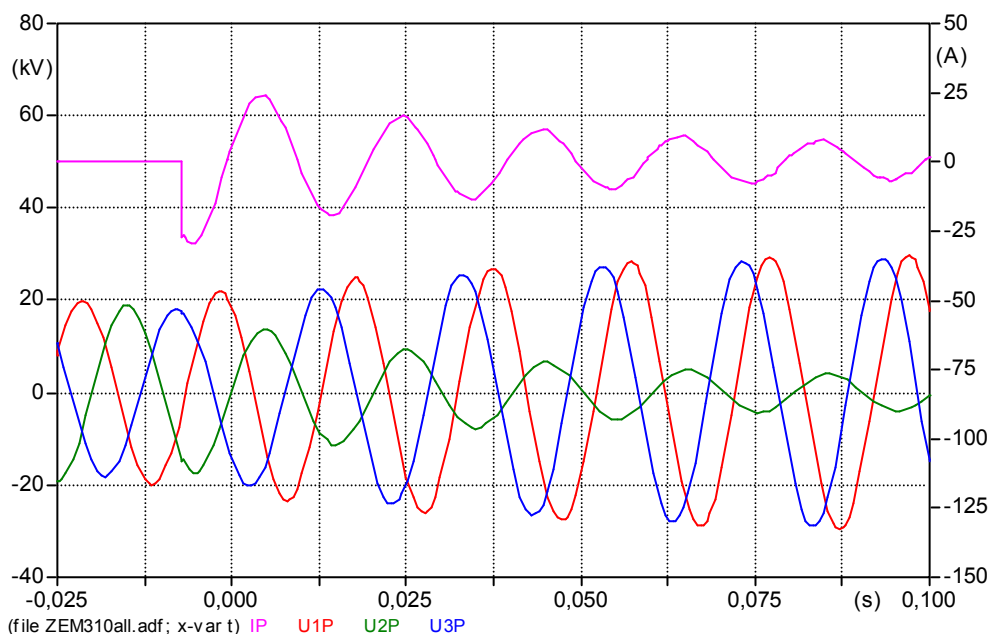
Obr. 4-12 Fázorový diagram proudových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 0 \Omega$, rozladěná tlumivka)

4.5 Odporové zemní spojení (400Ω) - vyladěná tlumivka



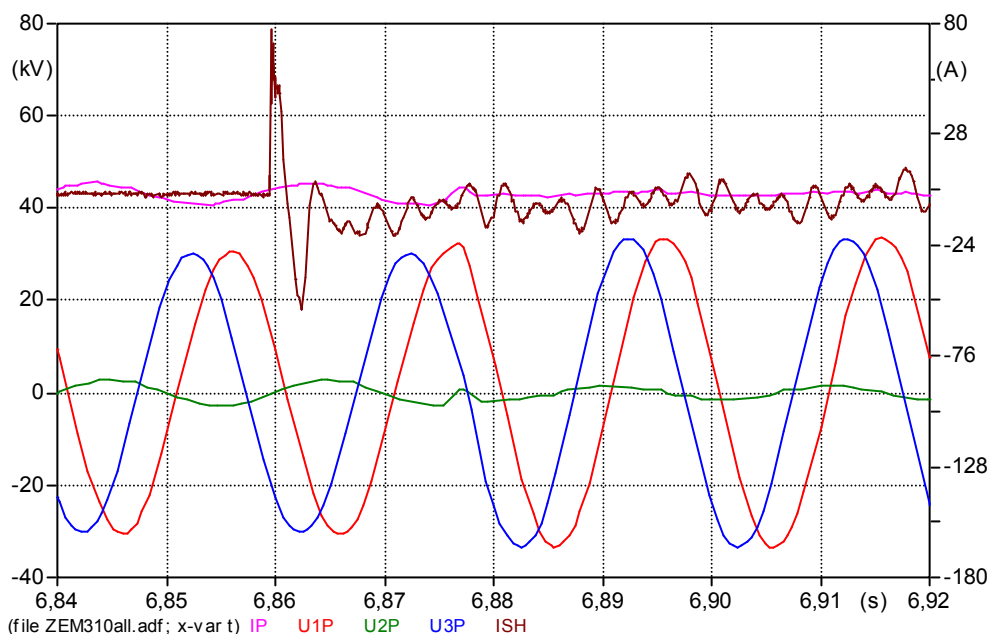
Obr. 4-13 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 400 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-14 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v okamžiku zemního spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 400 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-15 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu šentovanou fází I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 400 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)

VN)

$$\hat{U}_{1[0]} = 19800 \cdot e^{-298,2}$$

$$\hat{U}_{2[0]} = 18990 \cdot e^{-53,4}$$

$$\hat{U}_{3[0]} = 17950 \cdot e^{-177,9}$$

$$\hat{U}_{1P} = 30610 \cdot e^{-296,3}$$

$$\hat{U}_{2P} = 2830 \cdot e^{-96,9}$$

$$\hat{U}_{3P} = 30270 \cdot e^{-230,8}$$

$$\hat{U}_{LP} = 14800 \cdot e^{-154,6}$$

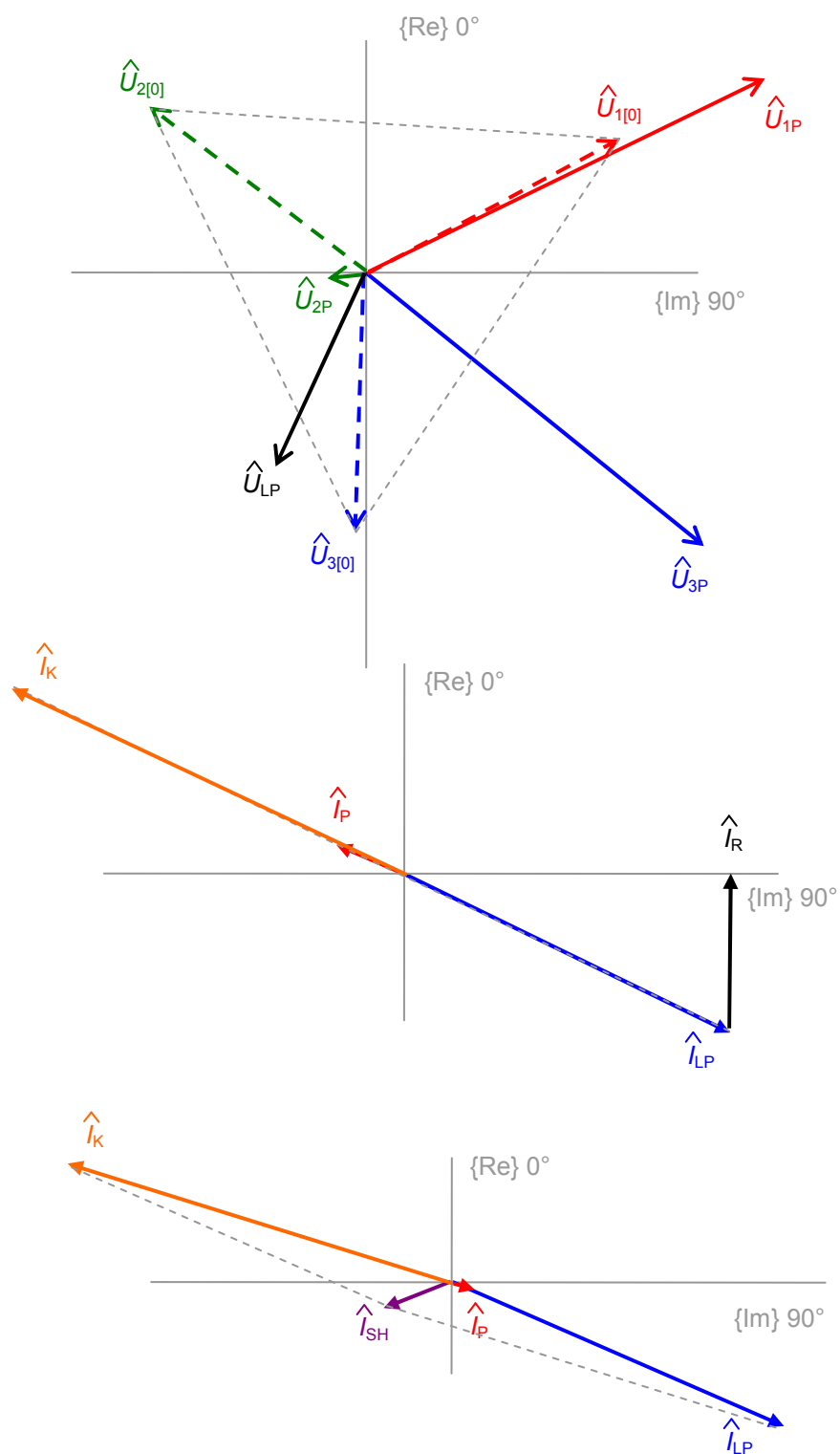
$$\hat{I}_{LP} = 186,2 \cdot e^{-244,1}$$

$$\hat{I}_P = 4,9 \cdot e^{-67,3}$$

$$\hat{I}_{SH} = 5,6 \cdot e^{246,8}$$

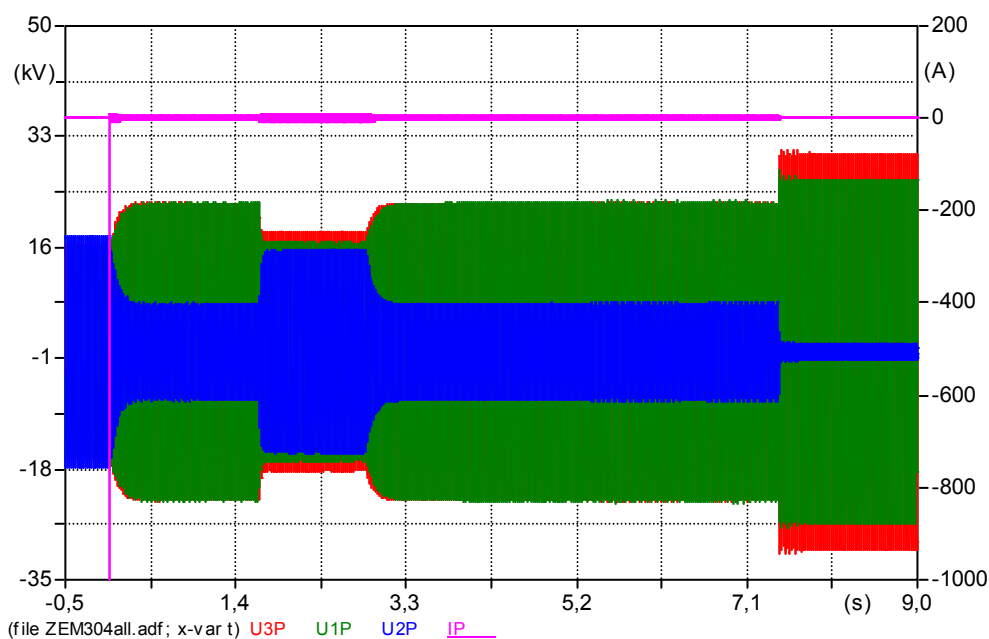
$$\hat{I}_P = 1 \cdot e^{106,3}$$

$$\hat{I}_{LP} = 229,4 \cdot e^{112,6}$$



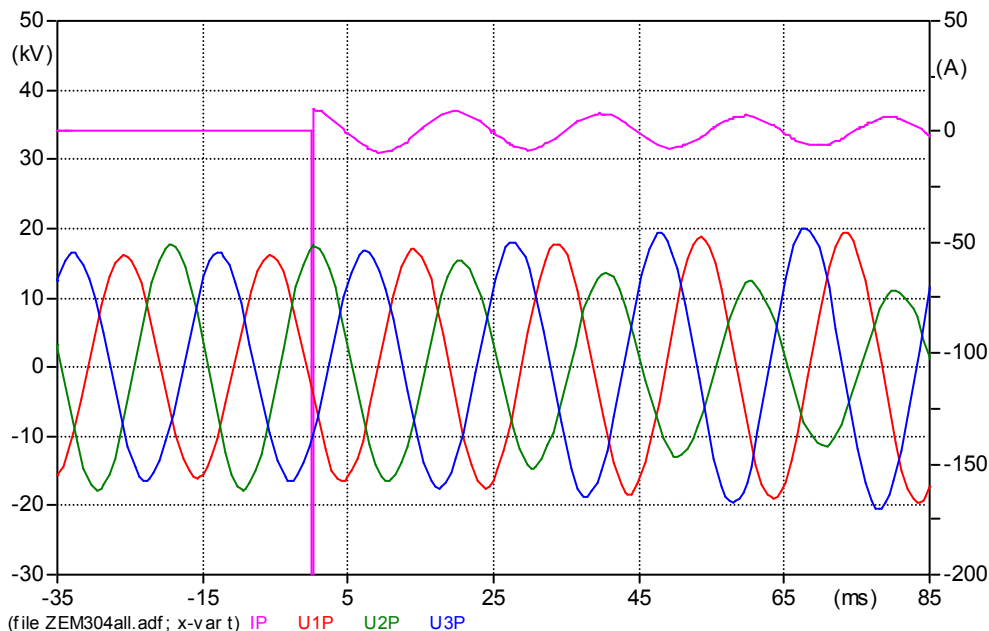
Obr. 4-16 Fázorové diagramy napětových a proudových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_p \rightarrow 400 \Omega$, vyladěná tlumivka)

4.6 Odporové zemní spojení (1600Ω) - vyladěná tlumivka



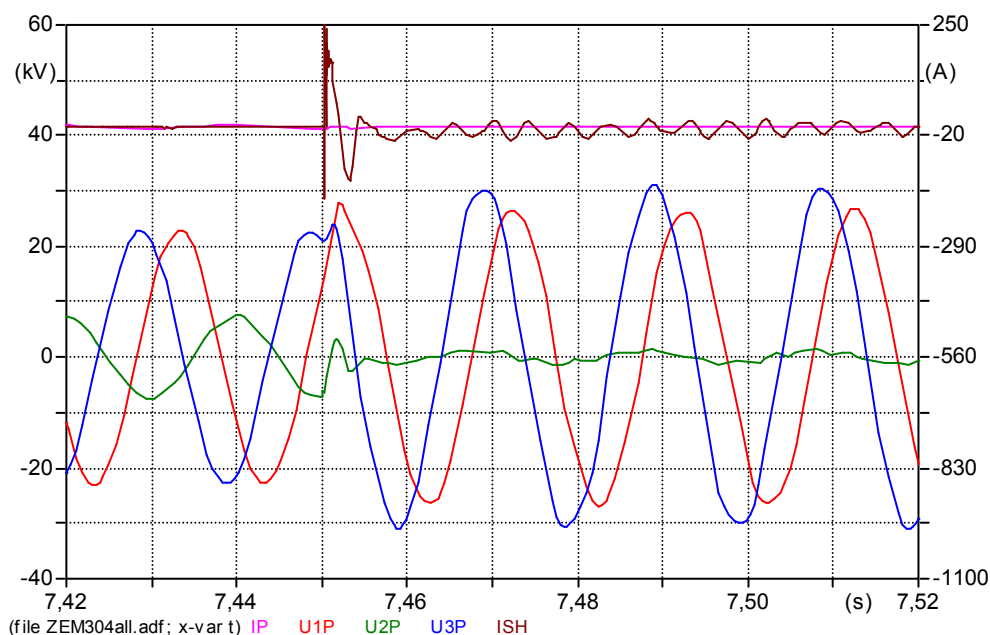
Obr. 4-17 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 1600\Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



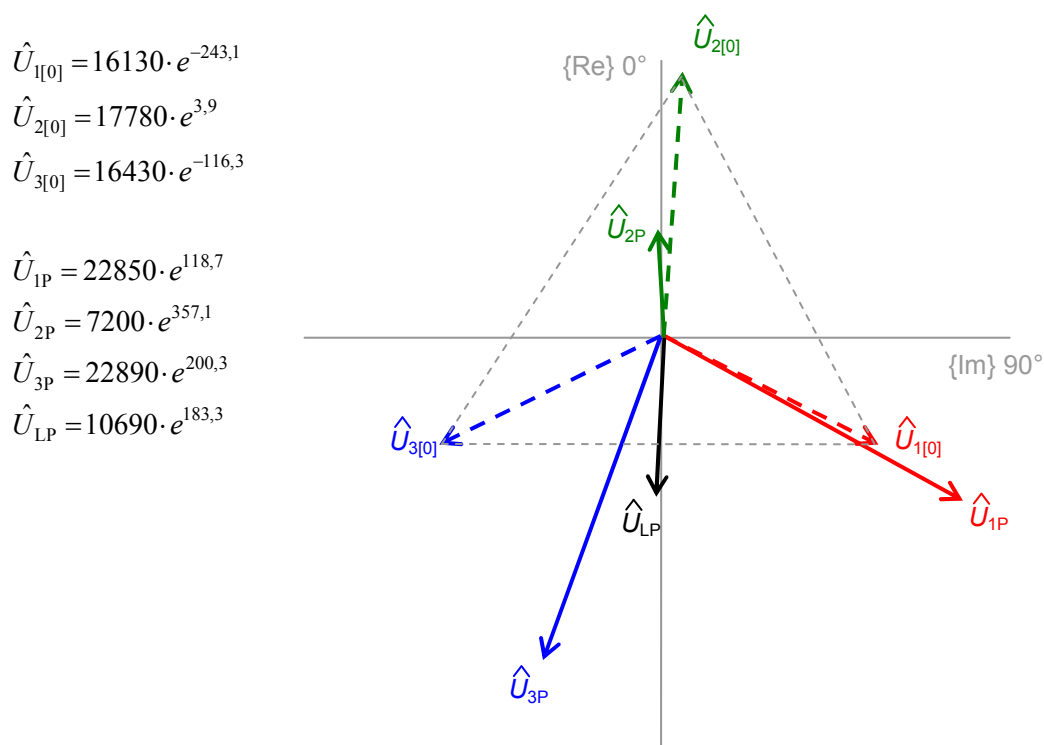
Obr. 4-18 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v okamžiku zemního spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 1600\Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-19 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu „šentované“ fáze I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 1600 \Omega$, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-20 Fázorový diagram napěťových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 1600 \Omega$, vyladěná tlumivka)

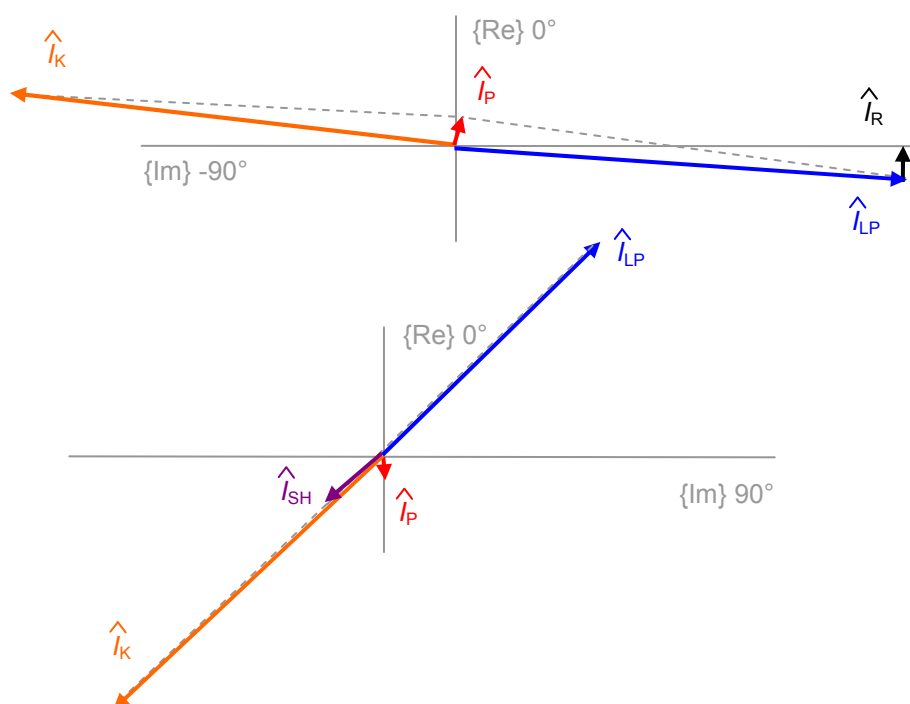
$$\hat{I}_{LP} = 134,3 \cdot e^{93,6}$$

$$\hat{I}_P = 4,3 \cdot e^{16}$$

$$\hat{I}_{SH} = 5,6 \cdot e^{228,9}$$

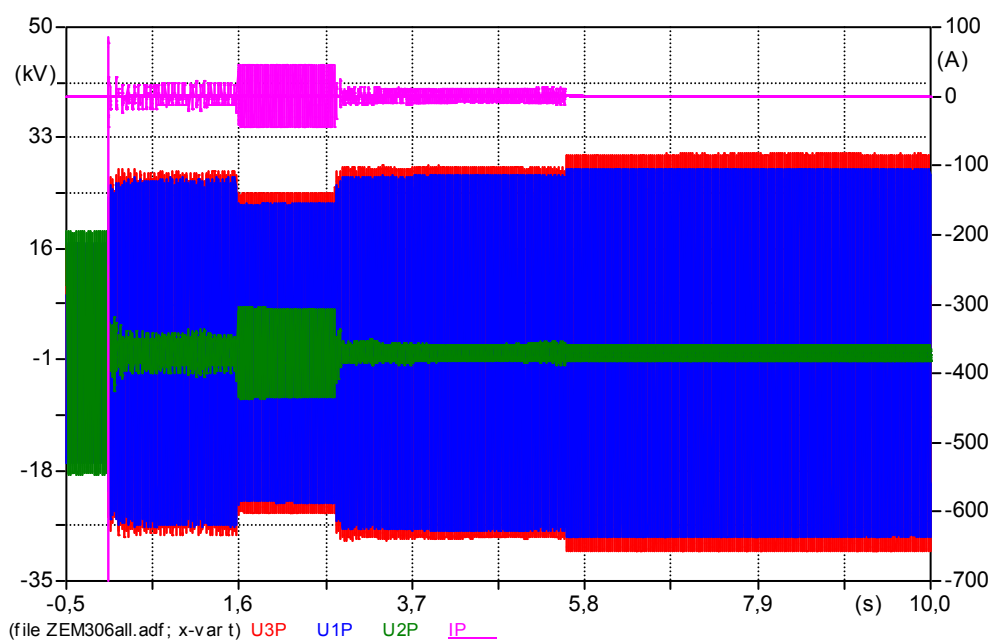
$$\hat{I}_P = 0,4 \cdot e^{176,2}$$

$$\hat{I}_{LP} = 63,3 \cdot e^{45,5}$$



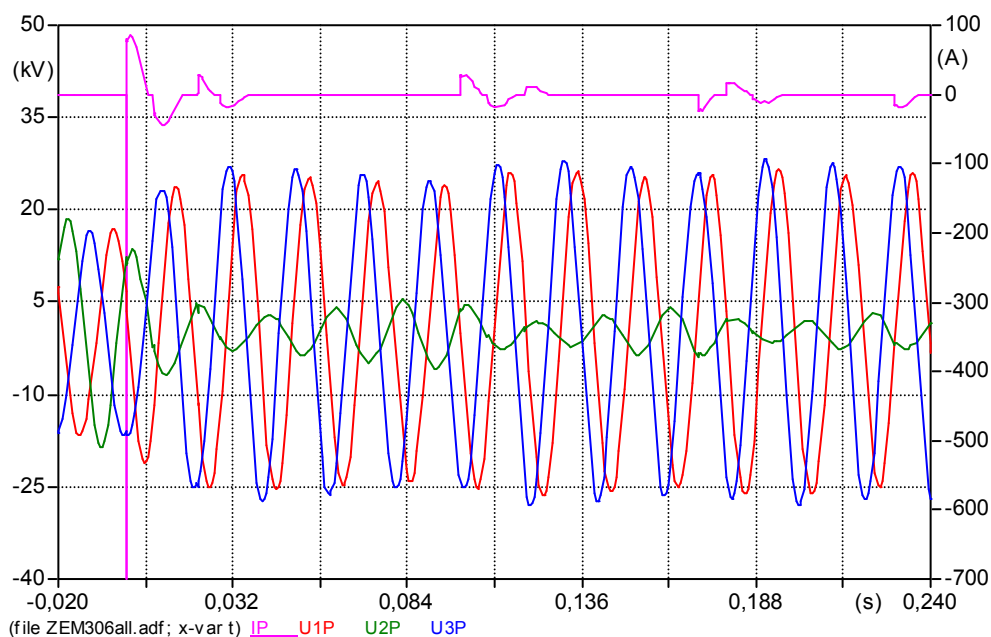
Obr. 4-21 Fázorové diagramy proudových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost ($R_P \rightarrow 1600 \Omega$, vyladěná tlumivka)

4.7 Obloukové zemní spojení (jiskřiště) - vyladěná tlumivka



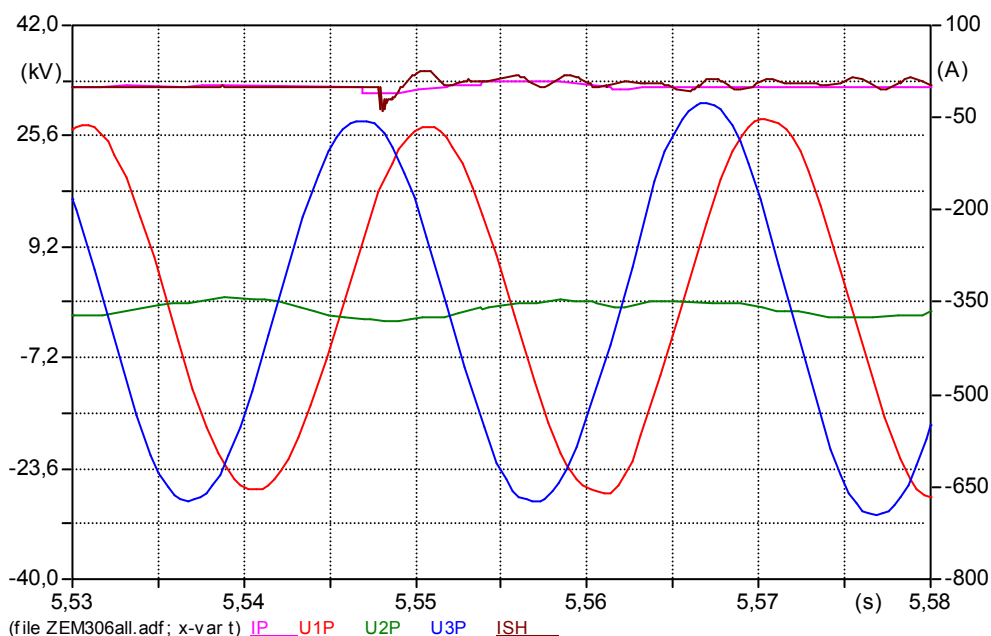
Obr. 4-22 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (jiskřiště, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-23 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v okamžiku zemního spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (jiskřiště, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-24 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu „šentované“ fáze I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (jiskřiště, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)

$$\hat{U}_{1[0]} = 16780 \cdot e^{-239,8}$$

$$\hat{U}_{2[0]} = 18530 \cdot e^{8,2}$$

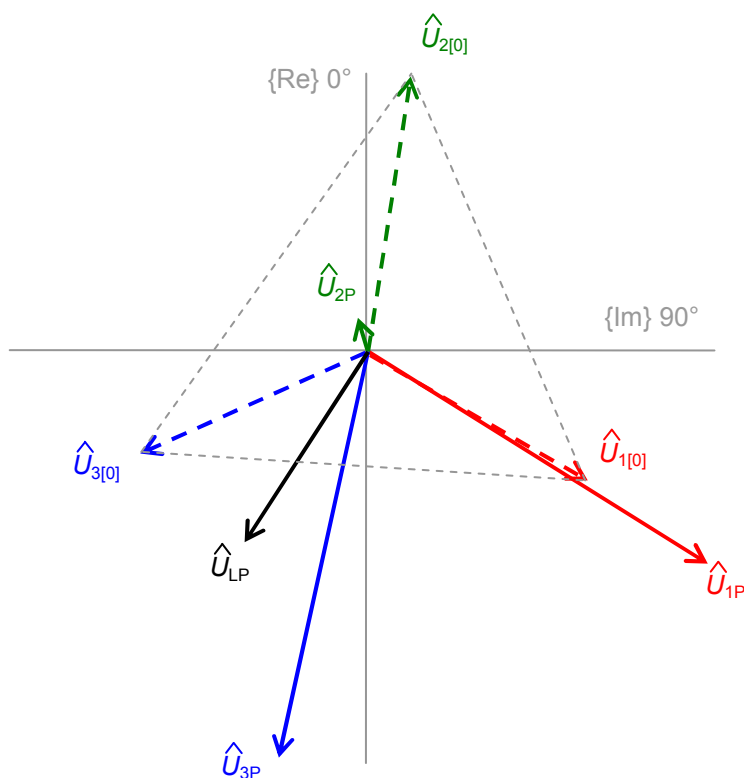
$$\hat{U}_{3[0]} = 16410 \cdot e^{-113,9}$$

$$\hat{U}_{1P} = 26520 \cdot e^{-237,8}$$

$$\hat{U}_{2P} = 2420 \cdot e^{-15,6}$$

$$\hat{U}_{3P} = 27600 \cdot e^{-167,7}$$

$$\hat{U}_{LP} = 15170 \cdot e^{-146,7}$$



Obr. 4-25 Fázorový diagram napěťových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (jiskřiště, vyladěná tlumivka)

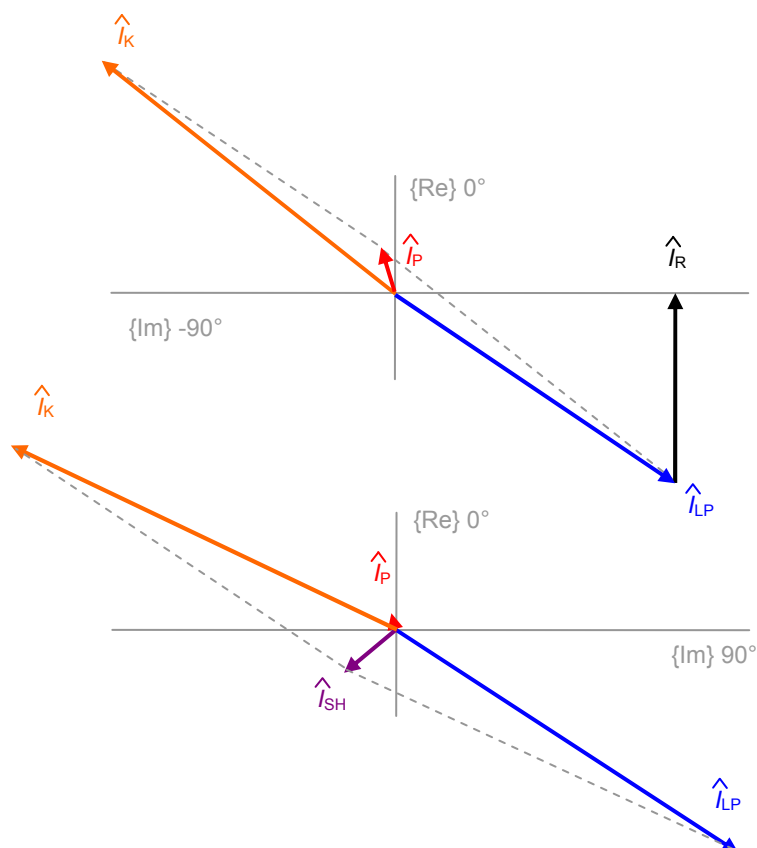
$$\hat{I}_{LP} = 190,5 \cdot e^{-236,1}$$

$$\hat{I}_P = 5,3 \cdot e^{-15,8}$$

$$\hat{I}_{SH} = 4,8 \cdot e^{229,9}$$

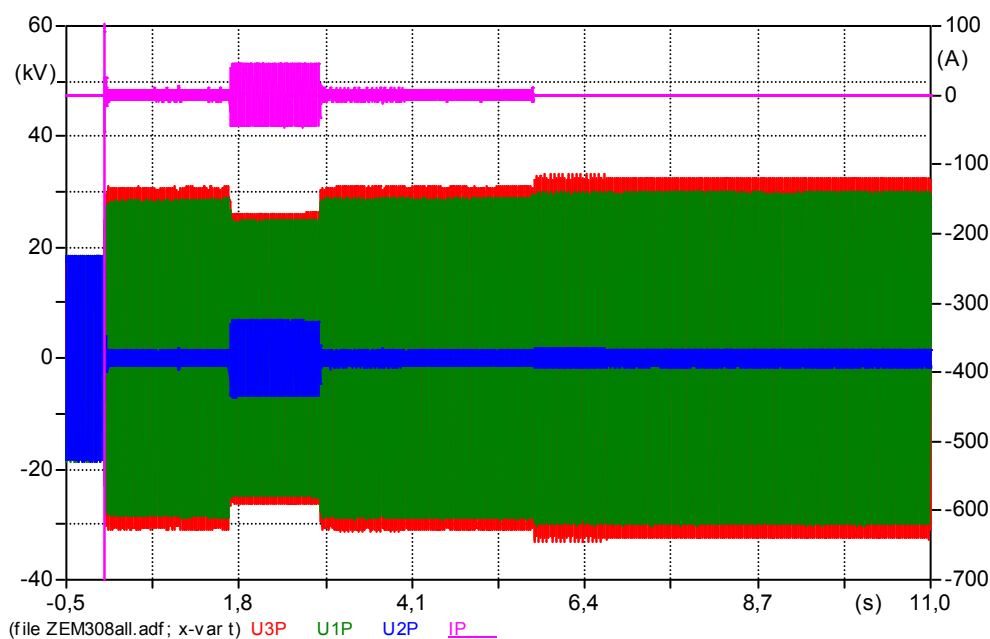
$$\hat{I}_P = 0,1 \cdot e^{-12,7}$$

$$\hat{I}_{LP} = 229,1 \cdot e^{122,8}$$



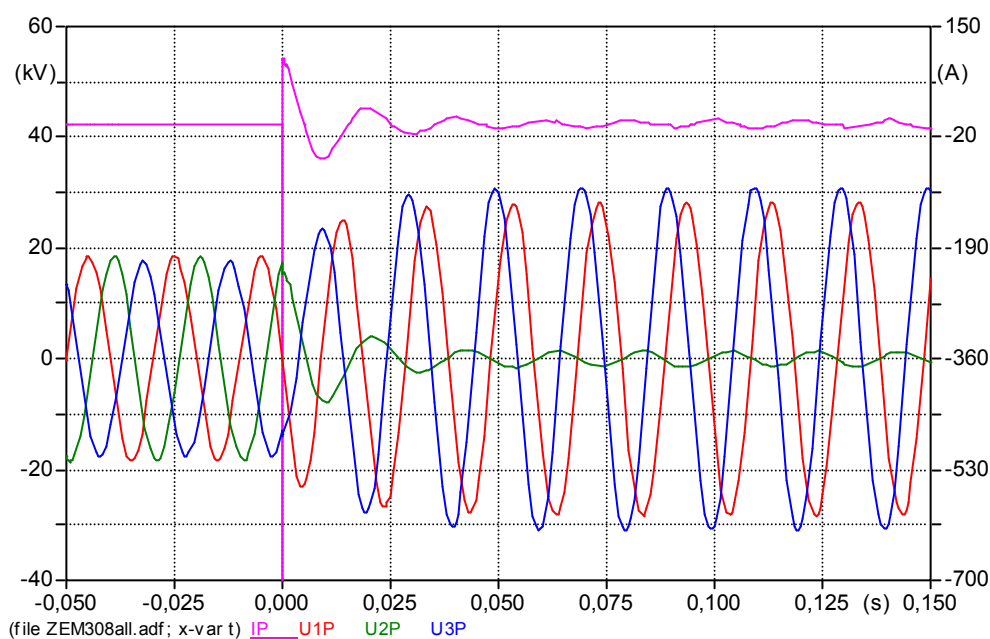
Obr. 4-26 Fázorové diagramy proudových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (jiskřiště, vyladěná tlumivka)

4.8 Obloukové zemní spojení (kabel) - vyladěná tlumivka



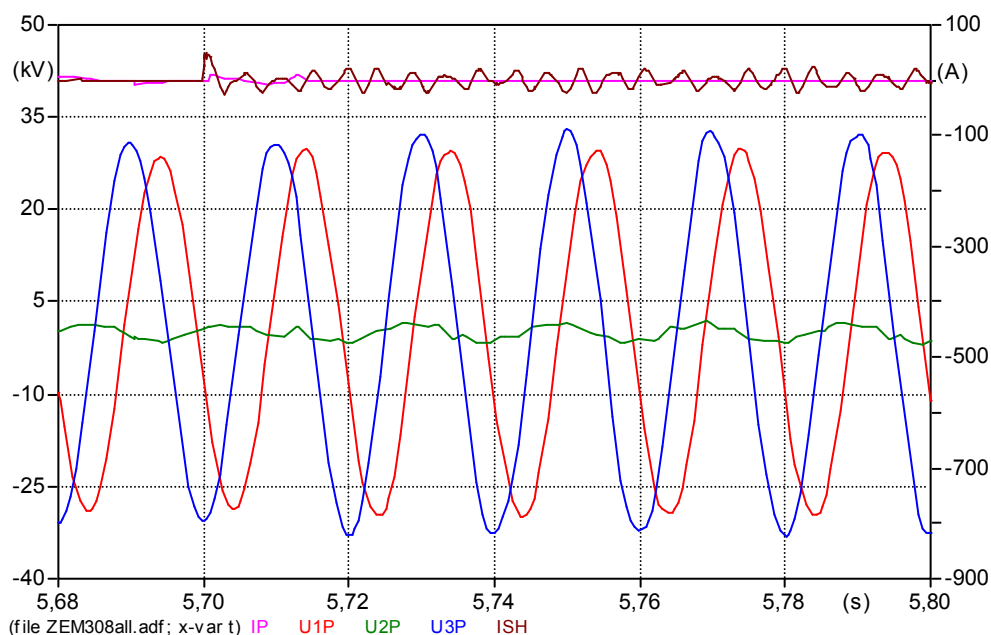
Obr. 4-27 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (kabel, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-28 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v okamžiku zemního spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (kabel, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-29 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu šentovanou fází I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (kabel, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)

$$\hat{U}_{1[0]} = 18540 \cdot e^{-219,7}$$

$$\hat{U}_{2[0]} = 18480 \cdot e^{34,4}$$

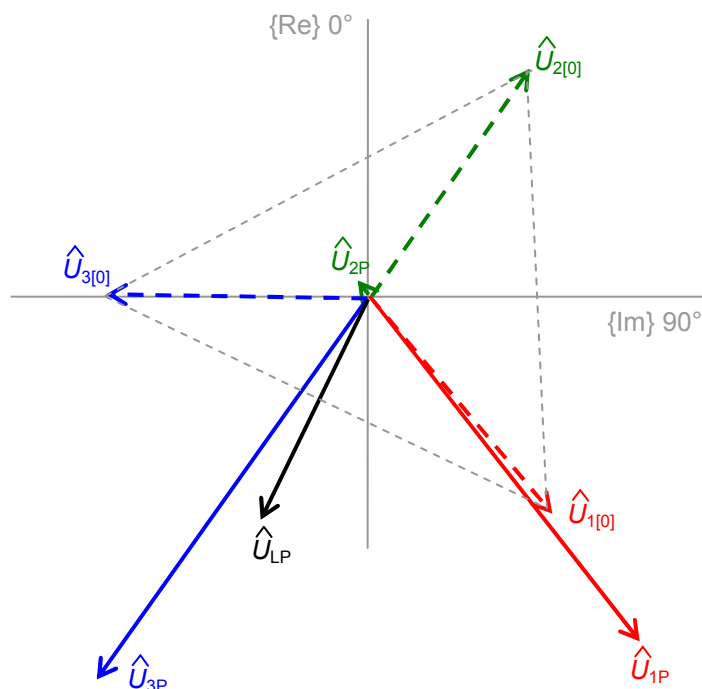
$$\hat{U}_{3[0]} = 17450 \cdot e^{-88,9}$$

$$\hat{U}_{1P} = 28650 \cdot e^{-218,3}$$

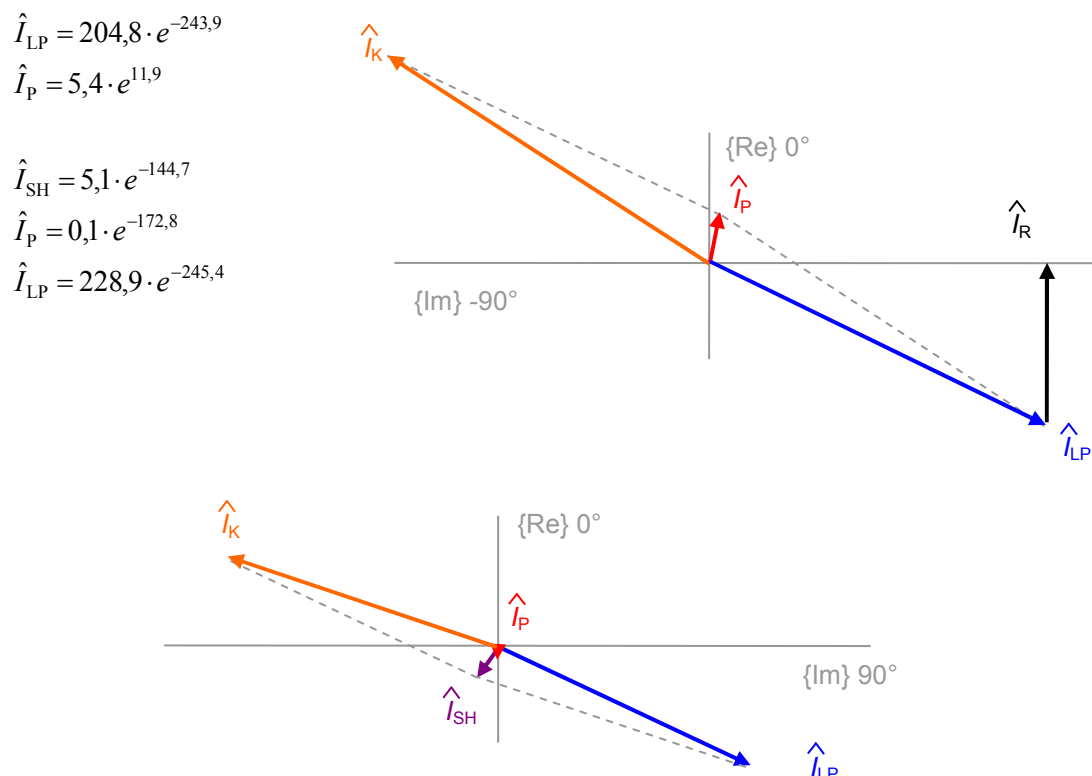
$$\hat{U}_{2P} = 1310 \cdot e^{-36,4}$$

$$\hat{U}_{3P} = 30980 \cdot e^{-145,4}$$

$$\hat{U}_{LP} = 16310 \cdot e^{-154,3}$$

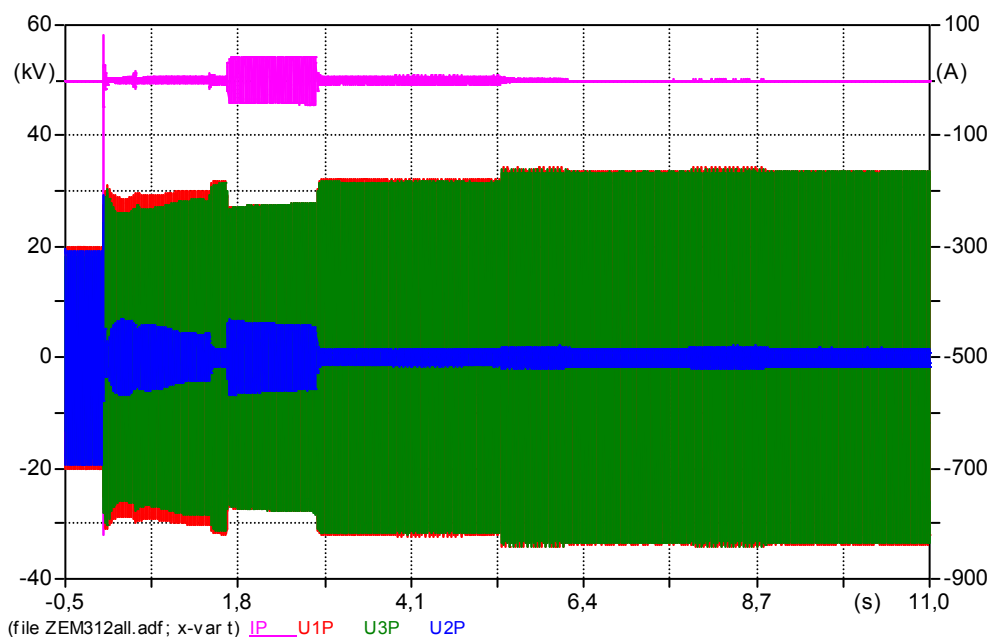


Obr. 4-30 Fázorový diagram napěťových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (kabel, vyladěná tlumivka)



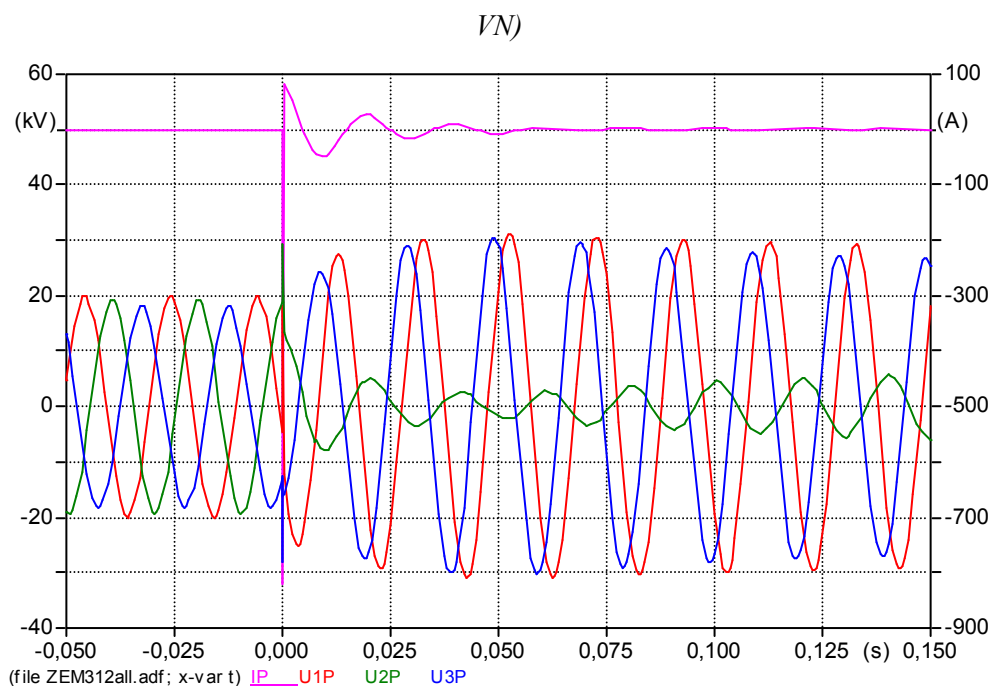
Obr. 4-31 Fázorové diagramy proudových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (kabel, vyladěná tlumivka „ $I_K = 180A$ “)

4.9 Obloukové zemní spojení (konzola) - vyladěná tlumivka



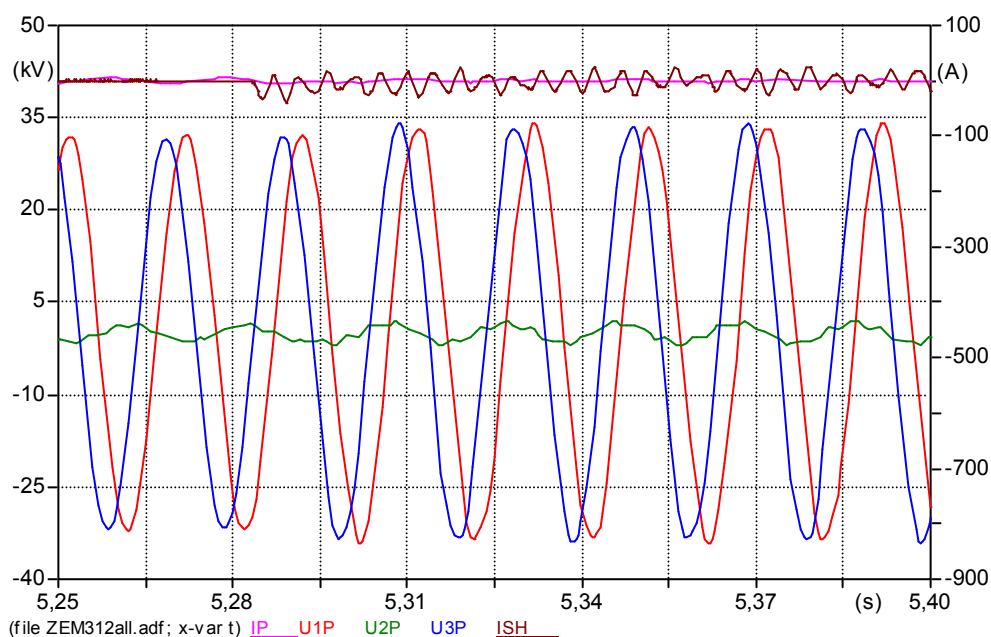
Obr. 4-32 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (konzola, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti)



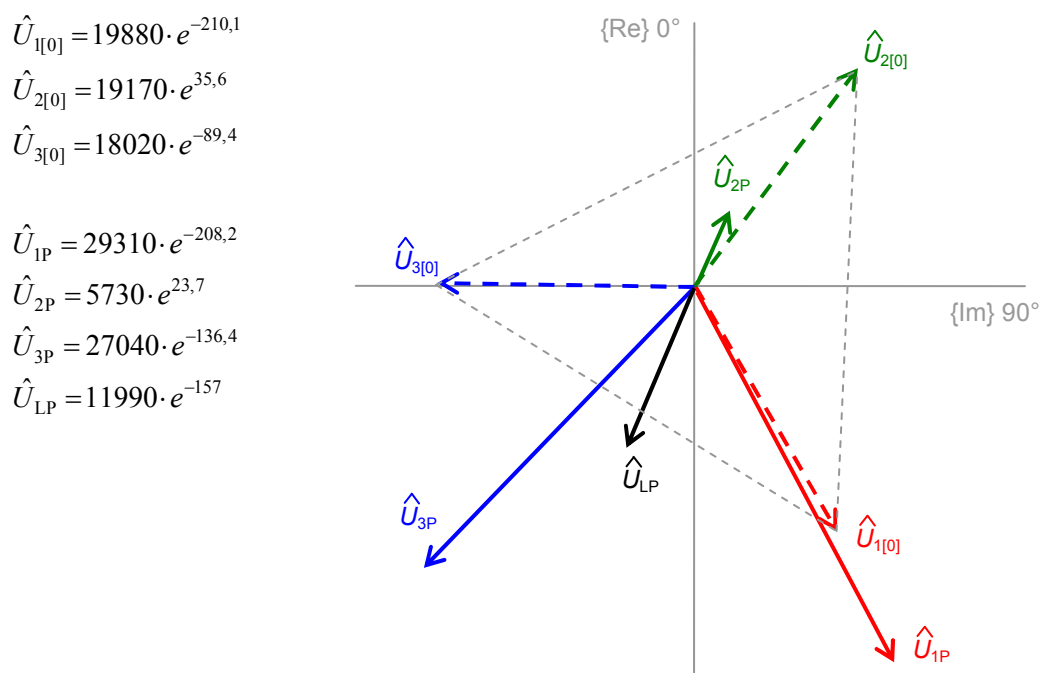
Obr. 4-33 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV) a poruchového proudu I_P (A) v okamžiku zemního spojení v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (konzola, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)

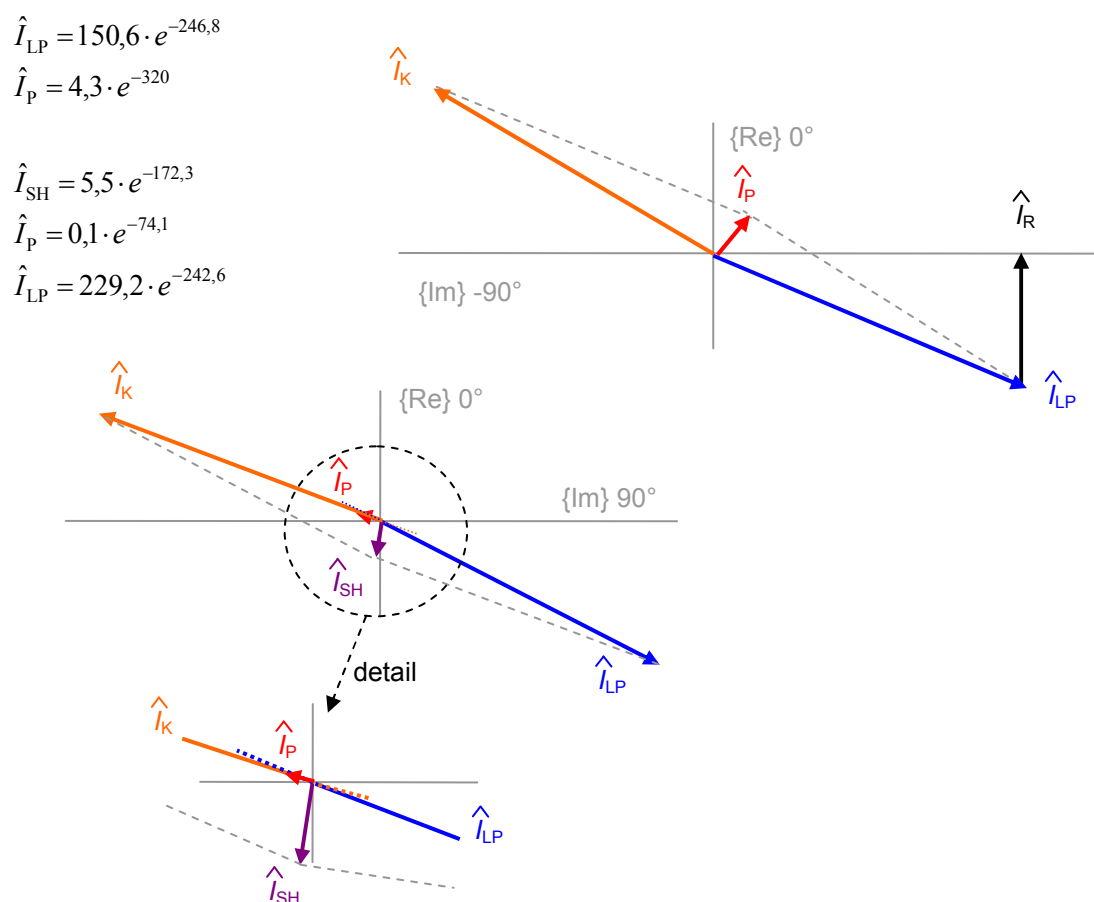


Obr. 4-34 Průběh okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy U_{1P} , U_{2P} , U_{3P} (kV), poruchového proudu I_P (A) a proudu šentovanou fází I_{SH} (A) v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (konzola, vyladěná tlumivka)

(Zdroj: Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN)



Obr. 4-35 Fázorový diagram napěťových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (konzola, vyladěná tlumivka)



Obr. 4-36 Fázorový diagram proudových poměrů v síti s nepřímo uzemněným uzlem přes indukčnost (konzola, vyladěná tlumivka „ $I_K = 180A$ “)

4.10 Vyhodnocení měření

Z obsáhlých dat měření „Experimentální měření napěťových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN [13]“ byly odečteny poruchové proudy a napětí při vzniku jednopólové zemní poruchy. Měření obsahovalo několik různých případů uzemnění místa poruchy. Měřilo se kovové zemní spojení, obloukové zemní spojení (kabel, jiskřiště, konzola) a odporové zemní spojení (400Ω , 1600Ω). Z výsledků měření byly zkonstruovány fázorové diagramy pro vyladěnou soustavu a jeden případ s podladěnou tlumivkou.

Z průběhů okamžitých hodnot napětí a následně z fázorových diagramů vidíme, že na zdravých fázích máme hodnotu sdruženého napětí. To by mohlo mít za následek, pokud by se distribuční síť provozovala s trvalým zemním spojením, prohoření některých izolátorů na stožárech vedení VN. Zařízení na rozvodně je dimenzováno na hodnotu sdruženého napětí. Petersenova tlumivka zapojená v uzlu distribučního transformátoru je schopna provozu tak dlouho, dokud nedojde k mezímu oteplení chladicího oleje.

Napětí na fázi se zemním spojením se pohybuje v rozmezí od 1 – 7 kV, záleží na typu poruchy. Z výsledků měření nelze jednoznačně říct, jak se bude napětí na poruchové fázi chovat v závislosti na typu poruchy. Teoreticky to znamená, čím větší odpor poruchy, tím větší poruchové napětí.

Rozvodna MŽR9 je provozována s nepřímo uzemněným uzlem přes indučnost. Takže tlumivka se snaží vykompenzovat většinu kapacitního proudu soustavy. Hodnota poruchového proudu (5-6A) se v závislosti na typu poruchy mění, ale jen minimálně, protože hodnoty odporu poruchy jsou voleny vedle sebe. Poruchový proud zemního spojení se změní, pokud je soustava provozována s podladěnou tlumivkou a to až na 8-násobek původního poruchového proudu. Tento provoz tlumivky je v praxi nežádoucí.

„Šentování“

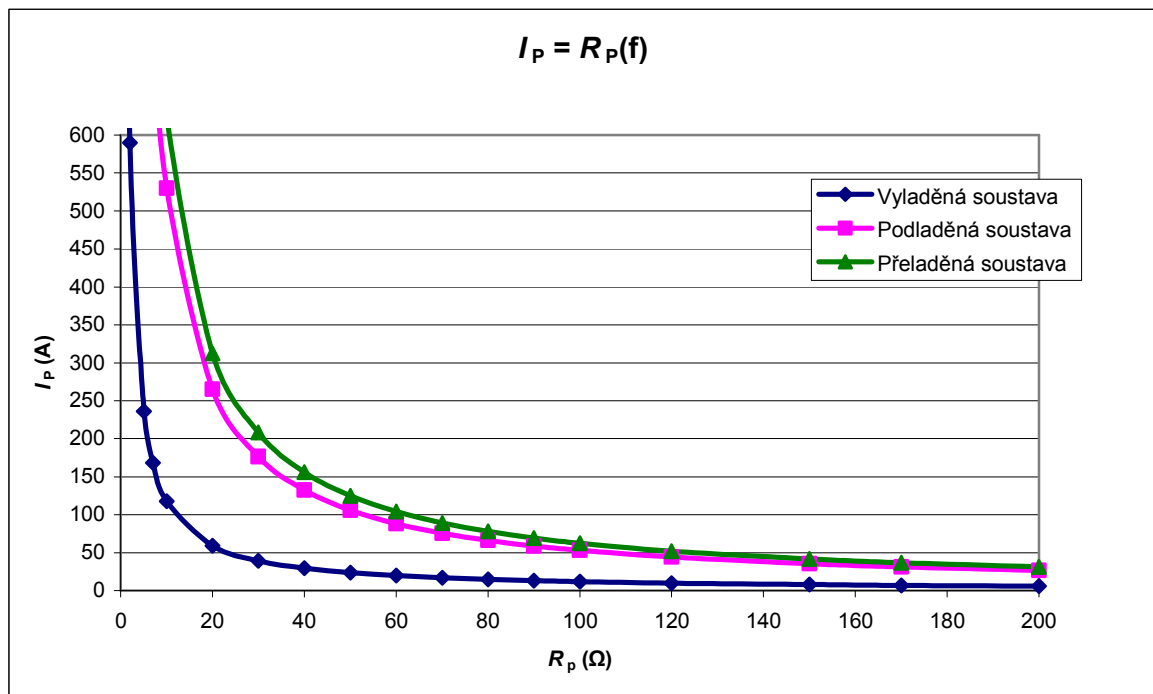
Teoretická efektivní hodnota dotykového napětí na vodiči na zemi při zapnutém „šentování“ by měla být do 50V. Poruchový proud zemním spojením do 300mA. Z toho vyplývá, že člověk, který by zvedl vodič ze země, by byl v sérii se zemním spojením. Dotykové napětí se nezmění, protože je porucha přesměrována do kratší „šentovací“ smyčky II viz. kapitola (3.1).

Bez „šentování“ se pohybuje dotykové napětí vodiče na zemi kolem stovek voltů a poruchový proud teče v jednotkách až desítkách ampér podle rozlehlosti soustavy a kvality izolace. Při aktivaci „šentování“ se zmenší dotykové napětí pod hladinu bezpečného napětí a poruchový proud je sto až tisíckrát menší. Ve venkovní kabelové síti oblouk ihned uhasíná a nezpůsobuje následné poruchy způsobené přepětovými jevy.

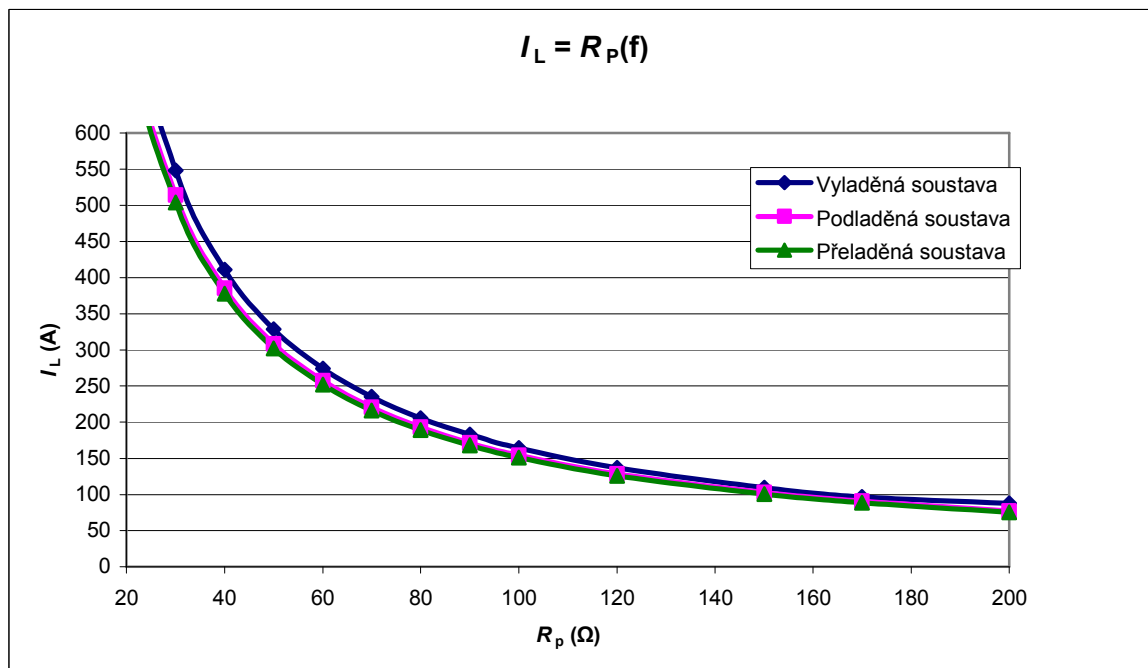
Z praktických vyhodnocení se napětí v místě poruchy pohybuje okolo 1kV a proud zemním spojením 100 - 300mA. Poruchový proud je téměř konstantní a nemění se v závislosti na různém typu poruchy. Tak velké poruchové napětí může být zapříčiněno špatným uzemněním měřicí soustavy. Tímto nebylo bohužel dosaženo bezpečné napětí v místě poruchy.

Jelikož žádná česká norma neřeší velikost dotykového napětí na vodiči VN spadnutém na zem, je princip „šentování“ značným přínosem pro bezpečnost provozu zemního spojení. Záleží na rozhodnutí provozovatele distribuční soustavy, s jakou zodpovědností se k bezpečnosti své soustavy postaví.

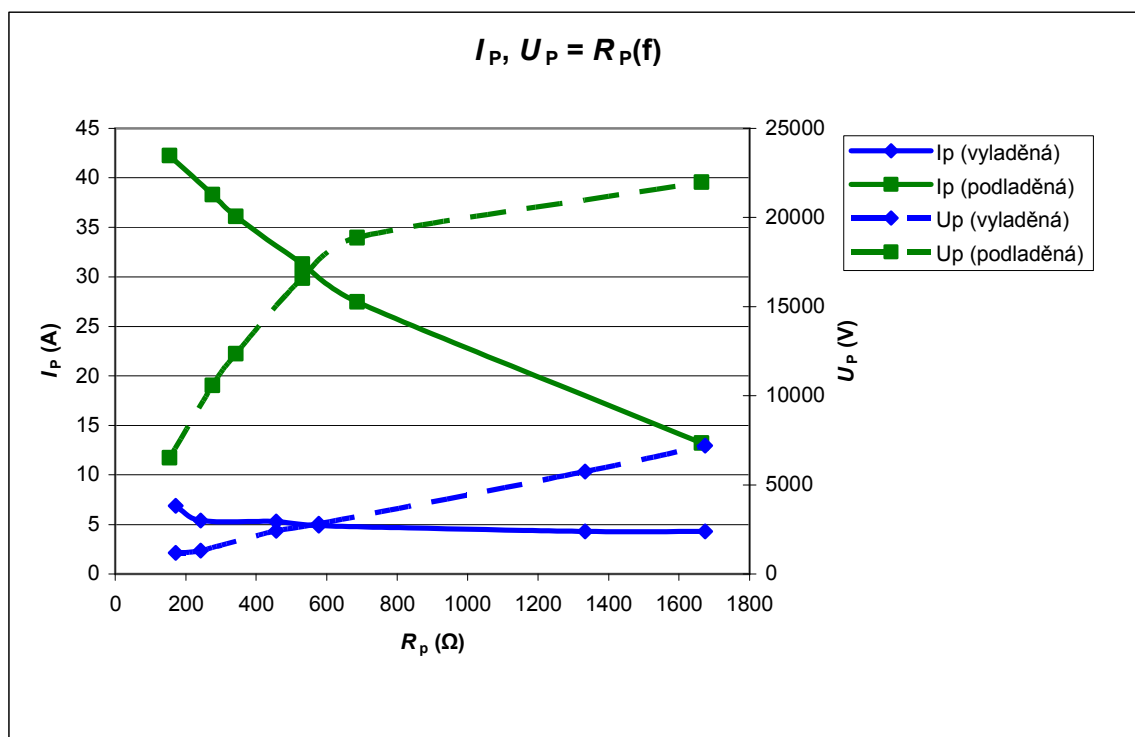
5 Vymezení metody „Šentování“ pro diagnostiku zemního spojení



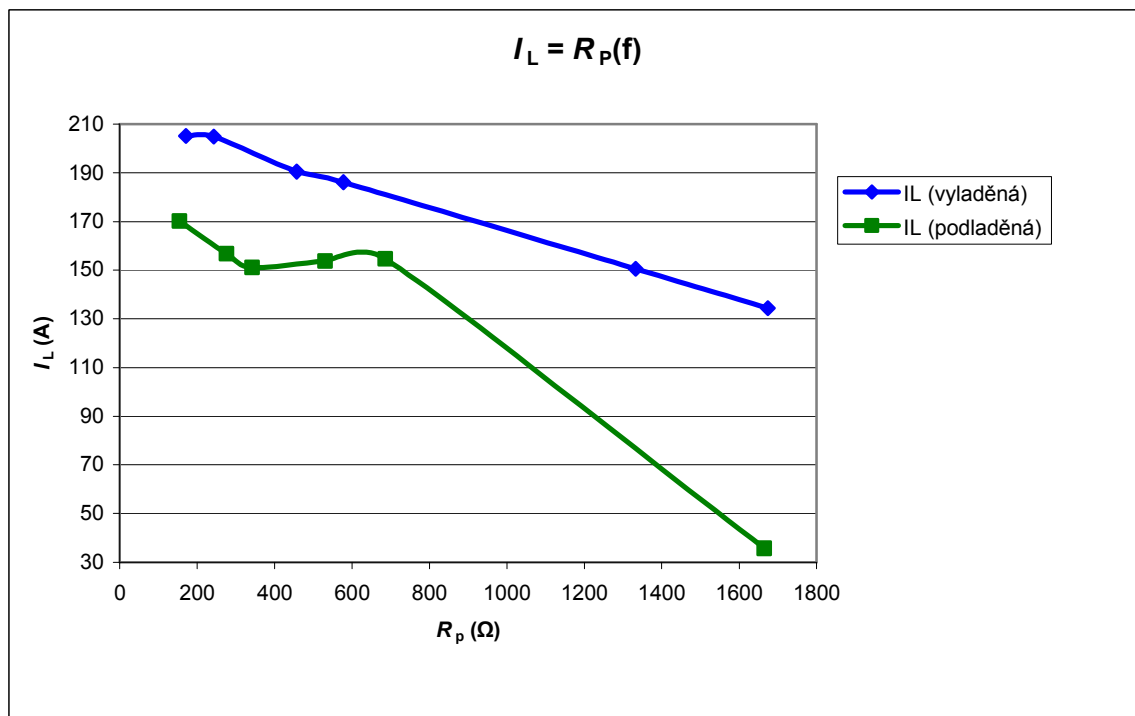
Obr. 5-1 Teoretická závislost proměnlivého odporu poruchy na poruchovém proudu soustavy



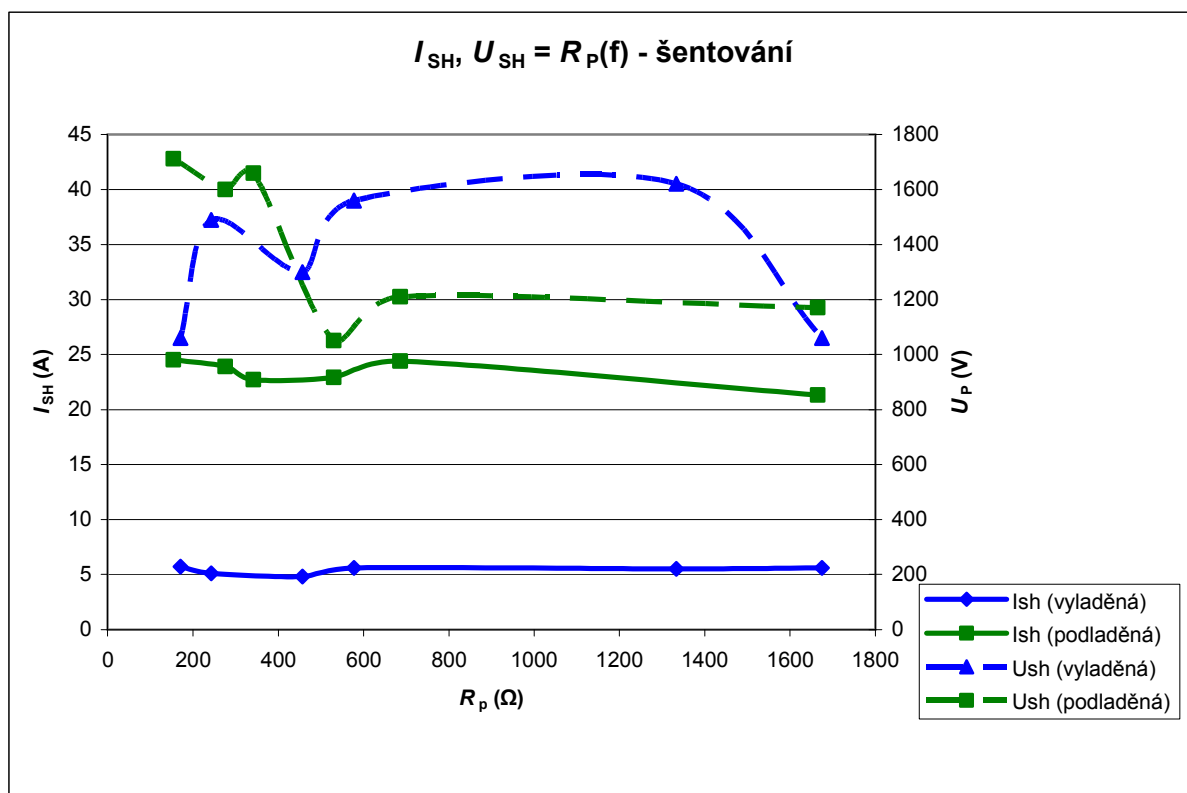
Obr. 5-2 Teoretická závislost proměnlivého odporu poruchy na proudu tekoucím tlumivkou



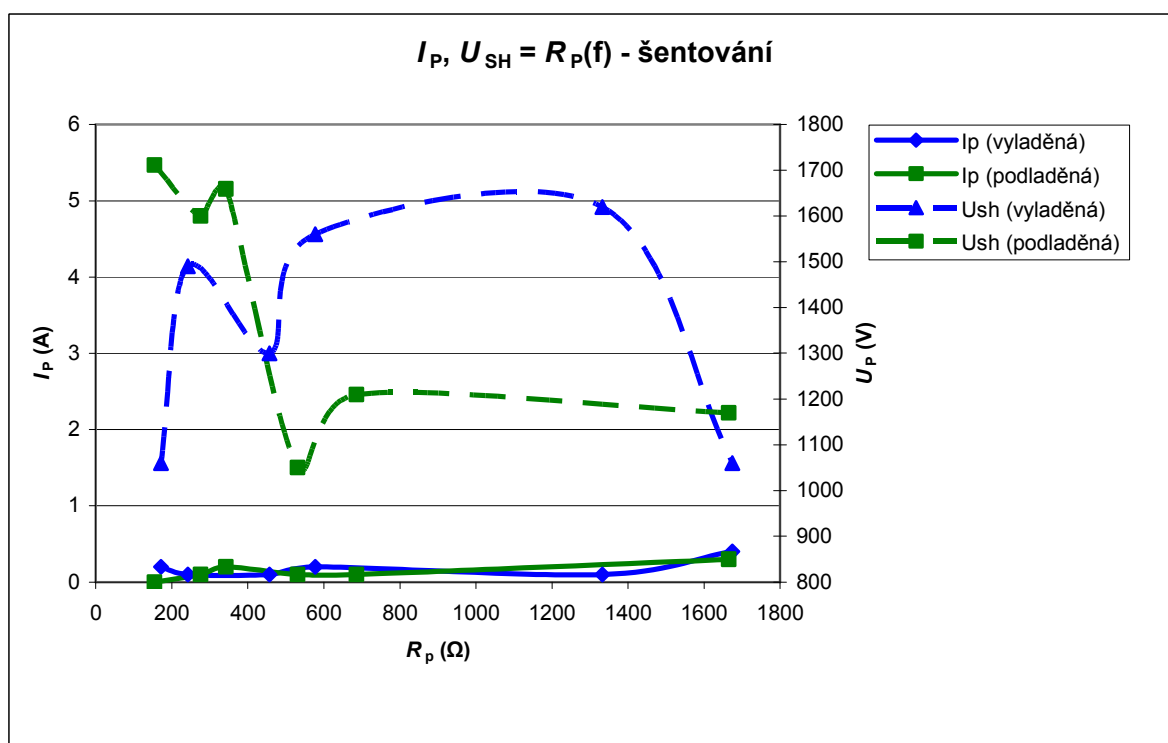
Obr. 5-3 Závislost odporu poruchy na poruchovém proudu a napětí na postižené fázi (vyladěná a podladěná soustava) (Experimentální měření č.3)



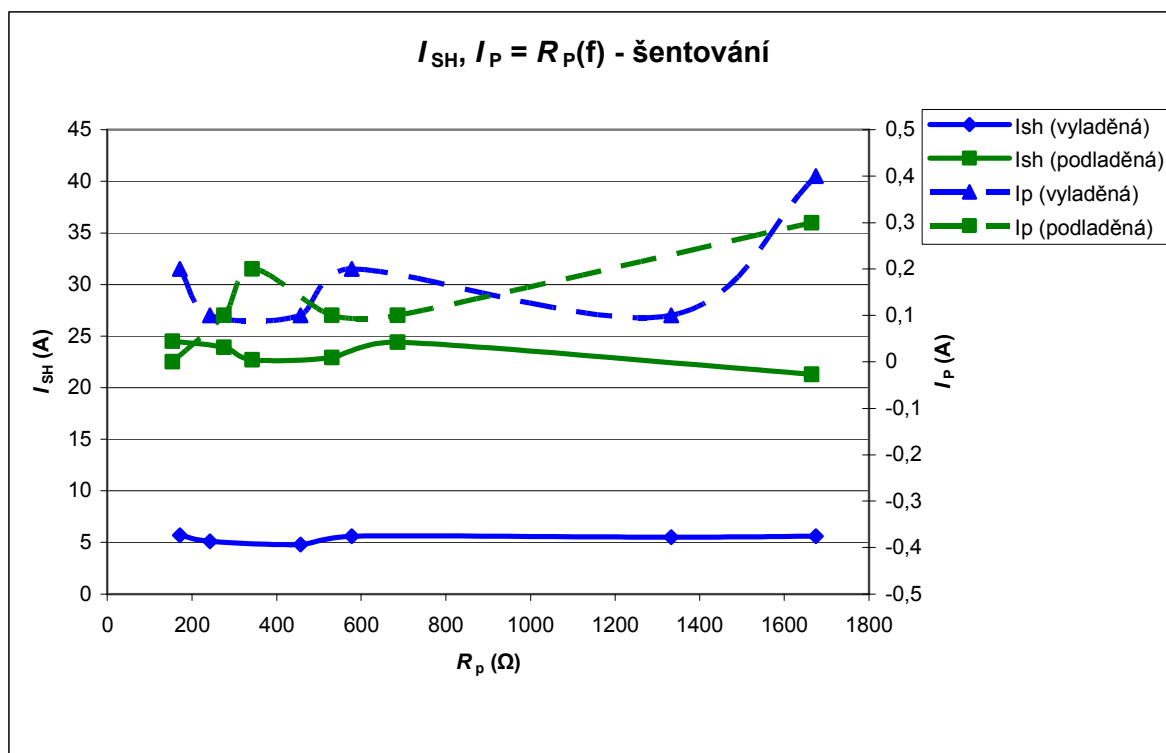
Obr. 5-4 Závislost odporu poruchy na proudu tekoucím tlumivkou (vyladěná a podladěná soustava) (Experimentální měření č.3)



Obr. 5-5 Závislost odporu poruchy na „šentovacím“ proudu a napětí na postižené fázi (vyladěná a podladěná soustava) (Experimentální měření č.3)



Obr. 5-6 Závislost odporu poruchy na poruchovém proudu při „šentování“ a napětí na postižené fázi „vyladěná a podladěná soustava“ (Experimentální měření č.3)



Obr. 5-7 Závislost odporu poruchy na „šentovacím“ a poruchovém proudu (vyladěná a podladěná soustava)

$R_P (\Omega)$	vyladěná				„šentování“			
	$R_{vyp.} (\Omega)$	$I_P (A)$	$I_L (A)$	$U_P (V)$	$I_{SH} (A)$	$I_P (A)$	$I_L (A)$	$U_{SH} (V)$
$R_P \rightarrow 0$	171,0	6,9	205,1	1180	5,7	0,2	226,8	1060
$R_P \rightarrow \text{kabel}$	242,6	5,4	204,8	1310	5,1	0,1	228,9	1490
$R_P \rightarrow \text{jiskřiště}$	456,6	5,3	190,5	2420	4,8	0,1	229,1	1300
$R_P \rightarrow 400$	577,6	4,9	186,2	2830	5,6	0,2	229,4	1560
$R_P \rightarrow \text{konzola}$	1332,6	4,3	150,6	5730	5,5	0,1	229,2	1620
$R_P \rightarrow 1600$	1674,4	4,3	134,3	7200	5,6	0,4	63,3	1060

$R_P (\Omega)$	podladěná				„šentování“			
	$R_{vyp.} (\Omega)$	$I_P (A)$	$I_L (A)$	$U_P (V)$	$I_{SH} (A)$	$I_P (A)$	$I_L (A)$	$U_{SH} (V)$
$R_P \rightarrow 0$	154,2	42,25	170,2	6514	24,5	0	180,1	1711
$R_P \rightarrow \text{kabel}$	276,1	38,3	156,7	10573	23,9	0,1	180,3	1600
$R_P \rightarrow \text{jiskřiště}$	342,5	36,1	151,1	12365	22,7	0,2	179,3	1659
$R_P \rightarrow 400$	530,6	31,3	153,7	16609	22,9	0,1	168,9	1050
$R_P \rightarrow \text{konzola}$	686,4	27,5	154,7	18875	24,4	0,1	177,7	1210
$R_P \rightarrow 1600$	1664,6	13,2	35,7	21973	21,3	0,3	164,2	1170

Tab. 5-1 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot pro (Obr. 5-3, Obr. 5-4, Obr. 5-5, Obr. 5-6)

5.1 Vyhodnocení

Z naměřených dat experimentálního měření v lokalitě u Nového Města na Moravě (Experiment č.3) byly zkonstruovány grafy. V grafech je zobrazena závislost odporu poruchy na poruchovém proudu, poruchovém napětí, napětí na tlumivce při poruše a závislosti poruchových hodnot při zapnutém „šentování“.

Teoreticky (Obr. 5-1) je vyhodnocen z ustálené hodnoty poruchového napětí kovového zemního spojení (vyladěná 1,1kV; podladěná 5,3kV; přeladěná 6,2kV), z něhož je dopočítáván poruchový proud na proměnlivém odporu poruchy. Z obrázku je patrné, že čím větší odpor poruchy, tím bude poruchový proud v místě zemního spojení menší. (Obr. 5-2) je vyjádřením proudu tekoucím na tlumivce při poruše v závislosti na proměnlivém odporu poruchy. Proud tekoucí tlumivkou při zemním spojení je dán velikostí kapacitního proudu dané distribuční sítě VN. Tlumivka dodává do soustavy induktivní proud a snaží se vykompenzovat kapacitní proud sítě, aby poruchový proud byl co nejmenší. Teoretické obrázky zahrnují všechny stavy provozu tlumivky, které se v dané lokalitě měřily.

Následující obrázky jsou praktickým vyjádřením reálného měření na venkovní síti VN v Novém Městě na Moravě. Z (Obr. 5-3) je patrné, že zvětšujícím se poruchovým napětím klesá poruchový proud soustavy, a to jak s vyladěnou, tak podladěnou tlumivkou. Na (Obr. 5-4) si všimněme, že s klesajícím poruchovým proudem nám klesá i proud na tlumivce. Čím větší odpor poruchy, tím je menší poruchový proud i proud na tlumivce. V následujících dvou obrázcích (Obr. 5-5, Obr. 5-6) je zobrazena závislost „šentovacího“ a poruchového proudu soustavy na napětí postižené fáze.

Na posledním obrázku (Obr. 5-7) můžeme vidět, že „šentovací“ proud je takřka neměnný v závislosti na různém druhu poruchy. Poruchový proud při aktivovaném „šentování“ klesne z původních jednotek ampér na stovky miliampér, přitom nezáleží na druhu poruchy, protože většina původního poruchového proudu teče uzemňovací soustavou rozvodny.

Závěr

V úvodní části diplomové práce, obsažené v 1. a 2. kapitole, je uveden základní pohled na používaná zapojení VN třífázové soustavy jak v bezporuchovém, tak v poruchovém stavu. Dále následuje popis metod pro lokalizaci místa zemní poruchy na venkovním vedení distribučního rozvodu VN. Je zde zmíněna důležitost velikosti přidavného odporníku, který má významný vliv pro lokalizaci zemních spojení. Lokalizace zemního spojení je významnou dobou poruchy.

V dnešní době je vyvíjen výrazný tlak na minimalizaci nedodávky elektrické energie. Doba lokalizace poruchy je ovlivnitelná technickým vybavením a jeho správným nastavením. V distribuční soustavě VN je nasazeno množství automatik, ochran a indikátorů. Bezchybná souhra mezi těmito prvky podporuje rychlé a selektivní vyhledání poruchy, a tím minimalizuje nedodávku elektrické energie.

V následující 3. kapitole je popsáno „šentování“, které využívá jednoduchý fyzikální princip. Proud v paralelních větvích se rozděluje v opačném poměru jejich impedancí. Poruchový proud zemního spojení je při zapnutém „šentování“ přesměrován do zemnicí soustavy napájecí rozvodny, kde pro kvalitu uzemnění rozvodny nebezpečí nehrozí. Princip „šentování“ respektuje všechny ochrany, automatiky a indikátory, které jsou již v síti instalovány. Tyto prvky po instalaci „šentování“ fungují dál v nezměněném režimu.

Z obsáhlých dat měření „Experimentální měření napětových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v síti VN“ byly odečteny poruchové proudy a napětí při vzniku jednopólové zemní poruchy. Měření obsahovalo několik různých případů uzemnění místa poruchy. Měřilo se kovové zemní spojení, obloukové zemní spojení (kabel, jiskřiště, konzola) a odporové zemní spojení (400Ω , 1600Ω). Z naměřených dat se pomocí programu Plot XY vykreslili časové průběhy napětových a proudových poměrů v síti s nepřímým uzemněním uzlem přes tlumivku. Z ustálených stavů je odečtena amplituda a fáze jednotlivých napětí a proudů. Je vidět, že na poruchový proud se v průběhu měření superponovaly vyšší harmonické, a tím byl průběh proudu značně deformován. Z těchto hodnot jsou zkonstruovány fázorové diagramy, z nichž je patrné, že nesprávným uzemněním svorky v místě poruchy vzniká přechodový odpor mezi poruchou a uzemněním distribučního transformátoru. Proto dochází k značným přepětím nejen na zdravých fázích, ale také na fázi postižené poruchou. Při měření kovového zemního spojení, kdy by se měl odpor poruchy blížit nule, se odpor pohybuje okolo 160Ω . Dále jsou zde zkonstruovány fázorové diagramy proudových poměrů při „šentování“ (trvalé uzemnění postižené fáze na rozvodně), z nichž je zřejmé, že „šentovací“ proud teče v protifázi s poruchovým proudem. Velikost poruchového proudu závisí jen na části nevykompenzovaného kapacitního proudu soustavy a nevykompenzované části proudu tekoucího na tlumivce. Vektorovým součtem těchto dvou proudů nám vznikne pouze malý poruchový proud 100x menší než u běžné jednopólové zemní poruchy. Místem poruchy nám teče poruchový proud pohybující se v řádech mA. Původní hodnota poruchového proudu nyní teče uzemňovací soustavou rozvodny.

V následující kapitole „Vymezení metody „šentování“ pro diagnostiku zemního spojení“ je věnována pozornost optimalizaci naladění tlumivky. Provoz měřené soustavy je specifikován vyladěnou, podladěnou a přeladěnou tlumivkou. V měření se převážně provozuje vyladěná a podladěná tlumivka.

Z obrázků jasně vyplývá, že „šentování“ má velký význam na bezpečnost v místě jednopólové zemní poruchy, protože poruchový proud se pochybuje ve stovkách mA. Ale současně se zde objevuje velké poruchové napětí kolem 1 kV, což je nepřípustná hodnota, která může být zapříčiněna špatným uzemněním při měření. Proto nebylo dosaženo bezpečného dotykového napětí v místě poruchy.

Seznam použité literatury

- [1] VANĚK, R., *Problematika přechodových jevů souvisejících se zemním spojením v sítích 22 kV*. Ostrava, 2006. Disertační práce na VŠB – Technická univerzita Ostrava,
- [2] ORSÁG, F., *Diagnostika elektrických výbojů v sítích vysokého napětí*. Ostrava, 2007. Disertační práce na VŠB – Technická univerzita Ostrava
- [3] VÁLEK, P., *Využití impulsní diagnostiky při lokalizaci místa zemního spojení v sítích vysokého napětí*. Disertační práce, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2004
- [4] ORSÁGOVÁ, J., *Lokalizace zemního spojení v radiální síti pomocí signálu HDO*. Brno, 2004. Disertační práce, VUT v Brně
- [5] Uživatelský manuál, *SPCJ 4D29 Modul kombinované nadproudové a zemní ochrany*, ABB, 1996
- [6] PROCHÁZKA, K., *Způsoby provozu uzlu sítí vysokého napětí*. Energetika roč. 24, 1974
- [7] LEHTONEN, M., HAHOLA, T., *Neutral Earthing and Power System Protection*, Finsko 1995
- [8] Uživatelský manuál, *Automatika odporu ARS-01*, EGE
- [9] ČSN 33 3070 – *Kompenzace kapacitních proudů v sítích vysokého napětí*
- [10] GRYM, R., *Chránění II*, 1. vyd. Praha: IRIS, 2004 ISBN 80-903540-0-9
- [11] MIŠÁK, S., *Analýza napětových a proudových poměrů Ipólových poruch ve vlastní spotřebě VN elektrárenských a průmyslových provozů*. Ostrava, 2007. Disertační práce na VŠB – Technická univerzita Ostrava
- [12] Uživatelský manuál, *RE 54 Směrová ochrana proti zemnímu spojení*, ABB, 1997
- [13] TOMAN, P., *Experimentální měření napětových a proudových poměrů při vzniku zemního spojení v sítích VN*, VUT – Brno
- [14] RICHTER, P., *Zemní spojení v sítích 6kV v elektrárenských provozech*. Ostrava, 2008. Bakalářská práce na VŠB – Technická univerzita Ostrava
- [15] SOKANSKÝ, K., *Zpráva o řešení projektu Programu Impuls č. FI-IM/200*, Ostrava, 2007